



Aalto-yliopisto  
Insinöörیتieteiden  
korkeakoulu

Henri Rissanen

## **Tammiriman palosuojamenetelmien kokeellinen ja laskennallinen arviointi**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 23.08.2017

Valvoja: Professori Simo Hostikka

Ohjaaja: DI Hannu Hirsi, DI Arto Lehtonen

---

**Tekijä** Henri Rissanen

---

**Työn nimi** Tammiriman palosuojaamenetelmien kokeellinen ja laskennallinen arviointi

---

**Koulutusohjelma** Rakenne- ja rakennustuotantotekniikka

---

**Pää-/sivuaine** Rakennetekniikka

**Koodi** R3001

---

**Työn valvoja** Professori Simo Hostikka, Aalto-yliopisto

---

**Työn ohjaajat** DI Hannu Hirsi, Aalto-yliopisto, DI Arto Lehtonen, Inlook Oy

---

**Päivämäärä** 23.08.2017

**Sivumäärä** 66+3

**Kieli** suomi

---

### Tiivistelmä

Suomen rakennusmääräyskokoelma asettaa paloluokkavaatimukset puurakenteisille sisäverhouksille. Puu on paloluokaltaan D-luokan materiaalia, jolloin sen käyttö sisäverhouksista on rajallista. Markkinoilta löytyy nykyisin lukuisia palonsuoja-aineita, joilla voidaan parantaa puun paloluokitus B-luokkaan asti.

Tuotteen paloluokitus määräytyy pääosin SBI-kokeen tuloksen perusteella. Tässä työssä tutkitaan matemaattista laskentamallia, jolla voidaan ennustaa palosuoja-aineella käsitellyn puun SBI-kokeen tulokset. Laskentamalli perustuu yksiulotteiseen termiseen liekinleviämismalliin sekä kartiokaloreimetrikokeen tuloksiin. Tutkimusta varten toteutettiin kartiokaloreimetrikokeita palosuoja-aineilla käsitellyille tammisille koekappaleille. Tutkittavilla palosuoja-aineilla on saavutettu B-luokka puulle.

Laskentamallin validoinnissa käytettiin Danish institute of fire and security technology:n palosuojuatulle puulle tehtyjen SBI- ja kartiokaloreimetrikokeiden tuloksia. Validoitua laskentamallia käytettiin tammisten koekappaleiden SBI-luokituksen ennustamiseen.

Koepoltetuille kappaleille saatiin paloluokituksen ennusteeksi C-luokka. Saatujen FIGRA-arvojen ennusteet olivat keskimäärin 46 % suurempia kuin paloluokkaan B vaadittu raja-arvo 120 W/s. Ennusteiden korkeat arvot johtuivat pääosin kartiokaloreimetrikokeiden tuloksissa esiintyneistä korkeista lämmönvapautumisnopeuksista. Erityisesti ensimmäisen lämmönvapautumisnopeuspiikin arvot vaikuttivat merkittävästi saatuihin ennusteisiin.

Työssä tutkittiin myös palosimulaatioiden käyttömahdollisuuksia palokokeiden tekemiseen. Simulaatioissa mallinnettiin kartiokaloreimetrikokeita käsittelemättömälle sekä palosuojuatuille koekappaleille. Simulaation tulokset toistivat hyvin oikeissa kartiokaloreimetrikokeissa esiintyvät palon eri vaiheet. Suurimmat erot olivat hiiltymisvaiheessa, missä FDS-malli yliarvioi lämmönvapautumisnopeuden keskimäärin 40 %.

---

**Avainsanat** Puun palaminen, FDS, Paloluokitus, Palosuoja-aine, Simulaatio

---



---

**Author** Henri Rissanen

---

**Title of thesis** Experimental and numerical study of fire retardants for oak laths

---

**Degree programme** Structural engineering and building technology

---

**Major/minor** Structural engineering

**Code** R3001

---

**Thesis supervisor** Professor Simo Hostikka, Aalto University

---

**Thesis advisor(s)** M.Sc. (tech.) Hannu Hirsi, Aalto University, M.Sc. (tech.) Arto Lehtonen, Inlook Oy

---

**Date** 23.08.2017

**Number of pages** 66+3

**Language** Finnish

---

### **Abstract**

The national building code of Finland sets the requirements for fire classification of interior wood claddings. Wood is generally a D class material which limits its usage in interior claddings. Today, there are plenty of fire retardants for woods which improve the fire classification of the wood to B class.

The fire classification is mainly based on the results of SBI-test. This thesis investigates a mathematical model for predicting SBI-test results for a fire retardant wood. The model is based on the one-dimensional thermal flame spread model and the basis of cone calorimeter data. For this thesis, cone calorimeter tests were performed to oak samples which were treated with different fire retardants. The tested fire retardants have improved woods classification to B class.

The results of SBI and cone calorimeter tests for fire-retardant wood, performed by Danish institute of fire and security technology, were used for the validation of the mathematical model. The validated model was used to predict the fire classification of the oak samples.

The predicted fire classification for the tested oak samples was class C. The predictions of FIGRA values were on average 46 % higher than the requirement of 120 W/s for class B. The high results of predictions were caused by the high values of heat release rates in cone calorimeter tests. The first peaks in the heat release rates had particularly great impact to predictions.

The use of fire simulations to simulate fire bench tests were also investigated in this study. The numerical simulation of cone calorimeter test was performed to untreated and fire-retardant treated samples. Simulation results replicated well the different phases of wood burning in cone calorimeter test. The major differences in results were in charring phase, where the FDS-model overpredicted heat release rate on average of 40 %.

---

**Keywords** Burning of wood, FDS, Fire classification, Fire retardant, Simulation

---

## Alkusanat

*Diplomityön aihe sai alkunsa työtoverini, Kari Nurmisen ideasta tutkia puun paloluokitusta. Aihe hautui yli vuoden päivät päässäni, kunnes päätin ottaa yhteyttä professori Simo Hostikkaan. Hostikan esittelemä laskennallinen tapa paloluokituksen ennustaminen sai minut innostumaan aiheesta niin, että siitä jalostui tämä diplomityö.*

*Työn valvojanakin toiminutta professori Simo Hostikkaa haluan kiittää aiheen lisäksi myös työn aikana saamastani ohjauksesta, kommenteista sekä diplomityöni tarkistamisesta. Suuret kiitokset haluan myös osoittaa työni ohjaajille, DI Hannu Hirrelle ja DI Arto Lehtoselle kaikesta saamastani avusta työn aikana.*

*Haluaisin myös kiittää perhettäni saamastani tuesta, josta olen saanut uskoa ja voimaa koko opiskelujen ajan. Lisäksi haluaisin kiittää rakasta avovaimoani Idaa, joka on valanut toivoa minuun vaikeinakin hetkinä sekä jatkuvasti tsempannut diplomityön loppuun saattamisessa. Lupaen hyvittää kauniit kesäiset viikonloput, jotka jouduin uhraamaan diplomityöni tekoon.*

*Suuri kiitos myös koko Inlook Oy:n henkilöstölle, että olen saanut kuulua ”perheeseen” jo 10 vuotta. Teidän kanssa vietetyt vuodet ovat opettaneet ja antaneet paljon.*

Helsinki 23.8.2017

Henri Rissanen

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo .....	5
Merkinnät .....	6
Lyhenteet .....	6
1 Johdanto .....	7
1.1 Työn tausta .....	7
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja sisältö .....	8
2 Puun palaminen ja syttyminen .....	9
2.1 Puun koostumus .....	9
2.2 Puun palamisen eri vaiheet .....	9
2.3 Puun termofysikaalisten ominaisuuksien vaikutus palamiseen .....	10
3 Puun palosuojaus .....	13
3.1 Palosuojakäsittelyt .....	14
4 Puun paloluokitus ja palomääräykset .....	16
4.1 Rakennustarvikkeiden paloluokitus .....	16
4.2 Suomen rakennusmääräyskokoelman vaatimukset sisäverhouksille .....	18
5 Palo-ominaisuuksien tutkiminen .....	20
5.1 SBI-koe .....	20
5.2 Kartiokalometrikoe .....	21
5.3 Pienliekkikoe .....	23
5.4 Termogravimetrinen analyysi (TGA) .....	23
6 Paloluokituksen määrittäminen laskennallisesti .....	25
6.1 Yksikulotteinen terminen liekinleviämismalli .....	25
6.1.1 Laskentapohjan validointi .....	27
7 Tammirimojen kartiokalorimetrikokeet .....	33
7.1 Koekappaleet .....	33
7.2 Koejärjestelyt .....	34
7.3 Tulokset .....	35
7.3.1 B- ja C-sarjat .....	37
7.3.2 D- ja E-sarjat .....	41
8 Tammiriman paloluokitus laskennallisesti .....	44
8.1 B- ja C-sarjojen SBI-kokeiden ennusteet .....	44
8.2 D- ja E-Sarjojen SBI-kokeiden ennusteet .....	46
8.3 Yhteenveto .....	48
9 Palokokeiden simulointi .....	49
9.1 Fire dynamics simulator .....	49
9.2 Termogravimetrisen analyysin simulointi .....	49
9.3 Kartiokalorimetrikokeen simulointi .....	51
9.4 Optimointi .....	55
9.5 Palosuojajärjestelmien mallintaminen ja simulointi .....	57
10 Pohdinta .....	59
11 Johtopäätökset .....	60
Lähdeluettelo .....	62
Liitteet	

## Merkinnät

A	[1/s]	Pre-eksponentiaalitekijä
E	[kJ/mol]	Aktivaatioenergia
c	[J/kg/K]	Ominaislämpökapasiteetti
$\dot{Q}$	[kW]	Lämmöntuotto
$\dot{Q}_{mat}$	[kW]	Koekappaleesta syntyvä lämmöntuotto
$\dot{Q}_0$	[kW]	Polttimesta syntyvä lämmöntuotto
$\dot{q}''$	[kW/m <sup>2</sup> ]	Lämmöntuottokäyrän arvo kartiokalomietrikokeesta
$\dot{q}_{cr}''$	[kW/m <sup>2</sup> ]	Materiaalin kriittinen säteilyvuon tiheys
$\dot{q}_{ext}''$	[kW/m <sup>2</sup> ]	Ulkoinen lämmöntuotto
R	[J/mol*K]	Kaasuvakio
r <sub>p</sub>	[K/s]	Materiaalissa tapahtuvan reaktion huippuarvo
T	[K]	Lämpötila
T <sub>p</sub>	[K]	Reaktion huippuarvon lämpötila
t	[s]	Aika
t <sub>ig</sub>	[s]	Karakteristinen syttymisaika
w	[m]	Pyrolyysialueen leveys
x <sub>p0</sub>	[m]	Pyrolyysirintaman alkukorkeus
x <sub>p</sub>	[m]	Pyrolyysirintaman sijainti
x <sub>f</sub>	[m]	Liekin korkeus
Y <sub>s</sub>	[%]	Haihtuvan materiaalin massaosuus
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	Tiheys
λ	[W/mK]	Lämmönjohtavuus

## Lyhenteet

ASTM	Kansainvälinen standardisoimisjärjestö (The American society for testing and materials)
DBI	Danish institute of fire and security technology
EN	Euroopan Unionin jäsenvaltioiden hyväksymä standardi
FIGRA	Palokehityksen kasvunopeus (Fire growth rate index)
FDS	Fire dynamics simulator
HRR	Lämmönvapautumisnopeus (Heat release rate)
ISO	International Organization for Standardization
	Maaailmanlaajuinen kansallisten standardoimisjärjestöjen liitto
MLR	Massanmuutosnopeus (Mass lost rate)
SFS	Suomen Standardisoimisliiton hyväksymä standardi
SBI-koe	Yksittäisen palavan kappaleen palokoe (Single Burning item)
SMOGRA	Savuntuoton kasvunopeus (Smoke growth rate index)
TGA	Termogravimetrinen analyysi
THR	Kokonaislämmöntuotto (Total heat release)
VTT	Teknologian tutkimuskeskus

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn tausta

Suomen palomääräykset ovat ohjanneet tiukasti puurakenteiden käyttöä sisäverhouksissa. Puu on palava materiaali joka ei sovellu sellaisenaan kaikkiin rakentamisen käyttökohteisiin. Huhtikuussa 2011 voimaan tulleen Suomen rakentamismääräyskokoelman E1 osan sisältämät palomääräysten palovaatimukset muuttuivat materiaalista riippumattomiksi, jolloin erityisesti palosuojatun puun käyttömahdollisuudet rakentamisessa parantuivat. Vaikka puun käyttö on lisääntynyt viime vuosina rakentamisessa, on palosuojatun puun käyttö vielä kohtalaisen vähäistä Suomessa.

Markkinoilta löytyy nykyisin lukuisia palonsuoja-aineita, joilla voidaan suojata puutuotteita tehokkaastikin palamista vastaan. Palosuoja-aineiden toiminta perustuu erilaisiin kemiallisiin reaktioihin ja niiden yhdistelmiin. Puun palosuojaus voidaan toteuttaa pintakäsittelyillä, painekyllästämällä tai valmistuksen aikana lisättävillä ainesosilla. Diplomityön tutkimusta varten on valittu 2 eri pintalevitettävää palosuoja-ainetta. Työssä käytettävät palosuoja-aineet eivät aiheuta suuria muutoksia puun ulkonäköön, mikä on toivottu ominaisuus etenkin näkyviin jäävissä sisärakenteissa. Molemmat palosuoja-aineet ovat palosuojamekanismiltaan turpoavia eli lämpötilan noustessa, ne turpoavat muodostaen hiilikerrosta vastaavan pinnan puun päälle suojaten puuta palolta. Molemmat tutkittavat palosuoja-aineet on testattu puulle rakennustuotteiden luokitusstandardin SFS-EN 13501-1 vaatimalla SFS-EN 13823 yksittäisen palavan esineen kokeella (SBI-koe). Molemmilla palosuoja-aineilla on saavutettu kuuselle B-luokan paloluokitus kun käsittely on toteutettu valmistajan ohjeiden mukaisesti.

Rakennusmääräyskokoelmassa luokitellaan rakennustuotteet sen mukaan, miten ne vaikuttavat palon syttymiseen ja leviämiseen sekä miten ne muodostavat savua ja palavaa pisarointia. Rakennustuotteiden palo-ominaisuuksien tutkimiseen on olemassa erilaisia testausmenetelmiä, jotka testaavat tuotteen käyttäytymistä palotilanteissa. Yleisimpiä palotestausmenetelmiä ovat SBI-koe, säteilypaneelitesti, pienen liekin testi sekä kartiokaloremetrikoe. Tuotteen paloluokitus määräytyy pääosin SBI-kokeen tuloksen perusteella. Usein yksittäiselle tuotteelle SBI-kokeen tekeminen on hidas ja kallis prosessi, jonka lopputuloksena voi olla odotettua huonompi paloluokitus.

Tuotteen käyttäytymistä SBI-kokeessa voidaan kuitenkin arvioida kevyemmällä ja halvemmalla menetelmällä, joka perustuu matemaattiseen malliin sekä kartiokaloremetrikokeen tuloksiin. SBI-kokeiden tuloksia voidaan arvioida laskennallisesti yksiulotteista termistä liekinleviämissmallia hyödyntämällä. Tätä menetelmää varten tarvitaan  $50 \text{ kW/m}^2$ :n säteilyaltistuksella tehdyn kartiokaloremetrikokeen lämmöntuottokäyrä.

Lisäksi laskennallisten palosimulointien hyödyntäminen tuotekehityksessä, rakennus- ja paloteknisessä suunnittelussa sekä tulipalojen tutkinnassa on yleistymässä. Palosimuloinneilla saadaan esimerkiksi tietoa palon syttymistapahtumista, reaktioista ja vaikutuksista rakennuksen rakenteisiin. Palosimuloinnit voivat olla laajuudeltaan täyden mittakaavan tulipaloja tai kopioita palokokeista.

## **1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja sisältö**

Diplomityön päätavoitteena on tutkia paloluokituksen laskennallista arviointimenetelmää. Laskennassa käytetään yksiulotteista termistä liekinleviämismallia, jonka tuloksena saadaan ennusteet SBI-kokeen FIGRA-arvoista. Tutkimusta varten toteutetaan kartiokalorimetrikokeita palosuoja-aineilla käsitellylle tammelle, minkä pääasiallinen käyttötarkoitus on sisäverhoukset. Lisäksi kartiokalorimetrikoe tehdään koekappaleille, jotka ovat palosuoja-aineen lisäksi käsitelty vesilakalla, jotta nähdään lakan mahdollinen vaikutus paloon.

Lisäksi diplomityössä on osatavoitteena tutkia mitä rakennustuotteen paloluokitus oikeasti tarkoittaa ja miten se määräytyy tuotteelle. Lisäksi tutkitaan Suomen rakentamismääräyskokoelman asettamia palovaatimuksia sisäverhouksille. Toisena osatavoitteena on tutkia miten palosimulointia pystyttäisiin hyödyntämään tuotekehityksessä. Diplomityössä pyritään simuloimaan VTT:llä tehtyjä kartiokalorimetrikokeita sekä tutkimaan palosuoja-aineen toimintaa.

Työn alussa käydään läpi puun rakennetta, palamista sekä palosuojausta. Lisäksi esitellään puun termofysikaalisia ominaisuuksia, mitkä vaikuttavat erityisesti puun palo-ominaisuuksiin. Puun palosuojauksessa käsitellään palosuoja-aineiden toimintaa ja eroja. Lisäksi käydään läpi kuinka palosuojaus toteutetaan puuhun. Puuhun tutustumisen jälkeen esitellään Suomessa käytössä olevaa paloluokitusjärjestelmää rakennustarvikkeille. Lisäksi perehdytään rakennusmääräyskokoelman palomääräyksiin, jotka määrittävät eri tilanteissa tarvittavat paloluokitusvaatimukset esimerkiksi sisäverhouksille. Palo-ominaisuuksien tutkimista varten on olemassa monia menetelmiä, jotka käydään työssä läpi. Paloluokituksen laskennallista osuutta varten esitetään laskentaan liittyvä teoria sekä laskentapohjan validointi. Luvussa 8 kerrotaan VTT:llä tehtyjen kartiokalorimetrikokeiden toteutuksesta sekä tuloksista. Ennen johtopäätöksiä käydään lävitse diplomityön tutkinnallinen osuus eli tammisten koekappaleiden paloluokitusennusteet sekä simuloinnit. Johtopäätöksinä on yhteenveto saaduista tuloksista sekä pohdintaa niiden luotettavuudesta.



## 2 Puun palaminen ja syttyminen

### 2.1 Puun koostumus

Puussa on paljon haihtuvia aineita, keskimäärin 80 prosenttia puun kuivapainosta. Puu koostuu pääasiassa hiilestä, hapesta, vedystä sekä timestä. Puun sisältämät haihtuvat aineet kuten happi ja vety vaikuttavat merkittävästi puun palamiseen. Taulukossa 1 on esitelty lehti- ja havupuiden keskiarvolliset koostumukset. (Ragland, K. W. et al. 1991, s.164.)

*Taulukko 1 Havu- ja lehtipuiden keskimääräinen koostumus massayksikköinä. (Ragland, K. W. et al. 1991, s.164.)*

	Havupuut	Lehtipuut
Hiili	50.20	52.70
Happi	43.50	40.80
Vety	6.20	6.30
Typpi	0.10	0.20

Puun rakenne koostuu luonnollisista polymeereista eli selluloosasta, hemiselluloosasta, ligniinistä sekä vähäisestä määrästä uuteaineita. Selluloosa (40-45 % kuivapainosta) muodostaa puun rakenteessa kuituseinät. Selluloosa on glukoosin tiivistynyttä polymeeriä. Hemiselluloosa (20-35 % kuivapainosta) ympäröi selluloosan kuituseinämiä. Hemiselluloosa koostuu eri sokereista. Ligniini (15-30 % kuivapainosta) vahvistaa puun kuituosia. Ligniini koostuu pääosin vedystä sekä hiilestä. Ligniinillä on siis suuri vaikutus puun termisiin ominaisuuksiin. Lisäksi puu sisältää aina kosteutta vapaana ja solurakenteissa. (Knuutila 2003, s. 24-25.)

Puussa on lisäksi epäorgaanisia komponentteja kuten mineraaleja, jotka ovat sitoutuneet puun orgaaniseen rakenteeseen. Yleisimmät puussa esiintyvät mineraalit ovat mangaani, fosfori, rikki, kloori, fosfori, rauta, alumiini, sinkki, kalsium, kalium sekä magnesium. (Tissari 2008, s. 19.)

### 2.2 Puun palamisen eri vaiheet

Puun altistuessa tiettyihin lämpötiloihin alkavat erilaiset kemialliset komponentit lämpöhajoamaan puun rakenteessa vaikuttaen samalla puun muihin ominaisuuksiin. Puun palaminen koostuu kolmesta päävaiheesta:

1. Kappaleen kuivumisesta eli kosteus poistuu puusta.
2. Kappaleen pyrolysoitumisesta eli puu alkaa lämpöhajoamaan muodostaen syttyviä ja palavia pyrolyysikaasuja.
3. Kappaleeseen muodostuneen jäännöshiilen palamisesta eli pyrolyysikaasujen loputtua jäljellä oleva hiili palaa. (Ross, R. et al. 2010, 18-8.)

Pyrolyysi on haihtuvien aineiden reaktio, joissa haihtuvat aineet muuttuvat kaasumaiseen olomuotoon poistuen kiinteistä tai nestemäisistä aineista. Kiinteässä olomuodossa esiintyvät yhdisteet muuttuvat usein myös toisiksi yhdisteiksi. Pyrolyysi-reaktiossa suuret mole-

kyylit pilkkoutuvat pienemmiksi ja kevyemmiksi yhdisteiksi. Pyrolyysireaktiot käynnistyvät paineen ja lämpötilan kasvun seurauksena. (Nikolaeva, M. & Kärki, T. 2011. s.316.)

Puun syttymiseen tarvittava aika riippuu lämpötilasta sekä hapen saatavuudesta. Hapen saannin ollessa riittävä, puu syttyy +180 °C:ssa 15-20 minuutissa, +200°C:ssa 12-15 minuutissa, +250 °C:ssa 5-10 minuutissa ja +430°C:ssa 0,5 minuutissa. (Siikanen, U. 2008, s. 44.)

Puun pyrolyysi alkaa lämpötilan noustessa yli 100 asteen. Tässä lämpötilassa puuhun saattaa tulla kestävyyttä heikentäviä vaikutuksia riippuen puun lajikkeesta, sen sisältämästä kosteudesta ja altistumisen kestosta. (Ross, R. et al. 2010, 18-8.)

100-200 asteen välillä hemiselluloosa, selluloosa ja ligniini alkavat hajoamaan ja vesi poistuu höyrystymällä puusta muodostaen samalla muita kaasuja. Altistuksen kestäessä pitkään, puuhun saattaa syntyä hiiltymää hapen päästessä reagoimaan muodostuvan hiilikerroksen kanssa. (Ross, R. et al. 2010, 18-8.)

200-300 asteen välillä ligniini sekä hemiselluloosa alkavat pyrolysoitumaan kiivaasti ja synnyttämään kaasuja sekä kuumaa tervaa. Hemiselluloosan pyrolisaatio tapahtuu 200-300 asteessa ja ligniinin 225-400 asteessa. Erityisesti ligniinin hajoamisesta ja pyrolysoitumisen vaikutuksesta puuhun muodostuu hiiltä. (Ross, R. et al. 2010, 18-8.)

Kolmas vaihe tapahtuu 300-450 asteen välillä, jolloin syntyy runsaasti syttyviä kaasuja. Näiden kaasujen muodostuminen johtuu selluloosan polymeerirakenteen hajoamisesta 300-350 asteen lämpötilassa. 450 asteessa kaikki puun sisältämät ainesosat lopettavat kaasujen muodostamisen. Yli 450 asteen lämpötilassa puun jäännös eli hiili jatkaa lämpöhajoamista reagoidessaan hapen kanssa. Palaminen loppuu kun jäljellä on enää tuhkaa. (Ross, R. et al. 2010, 18-8.)

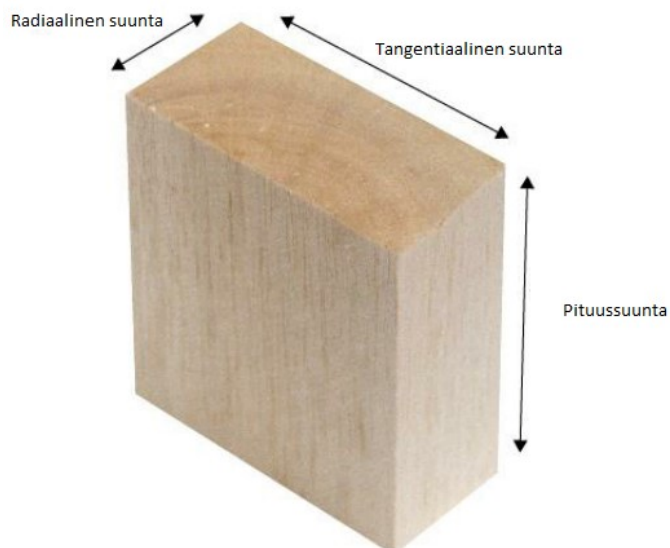
### **2.3 Puun termofysikaalisten ominaisuuksien vaikutus palamiseen**

Jotta puu syttyisi, täytyy puun lämpötilan nousta niin korkeaksi, että pyrolyysi tapahtuu tarpeeksi voimakkaasti sekä palamiseen tarvittavat kemialliset reaktiot käynnistyvät. Puun syttymiseen ja palamiseen vaikuttavat erityisesti puun kosteuspitoisuus, lämmönjohtavuus, tiheys sekä puun ominaislämpökapasiteetti. Lisäksi pinnan absorptiivisuudella, emissiivisyydellä, diatermisyydellä sekä puun syiden suunnalla on vaikutusta syttymiseen. (Hakkarainen et al. 2005, s. 11–14.)

Puun tiheys määrittyy pääosin puun kasvunopeudesta. Kasvunopeuteen vaikuttaa kasvu-alustan laatu, metsikön kasvutiheys, sademäärät, lämpötila sekä auringonvalon saatavuus. Eri puulajien tiheyksien välillä on suuria eroja. Lisäksi myös lajien sisäiset erot saattavat olla suuria. Taulukkoon 2 on kerätty suomen yleisimpien eri puulajien ilmakeivätiheyksiä 15 % kosteuspitoisuudella. (Siikanen, U. 2008, s. 43.)

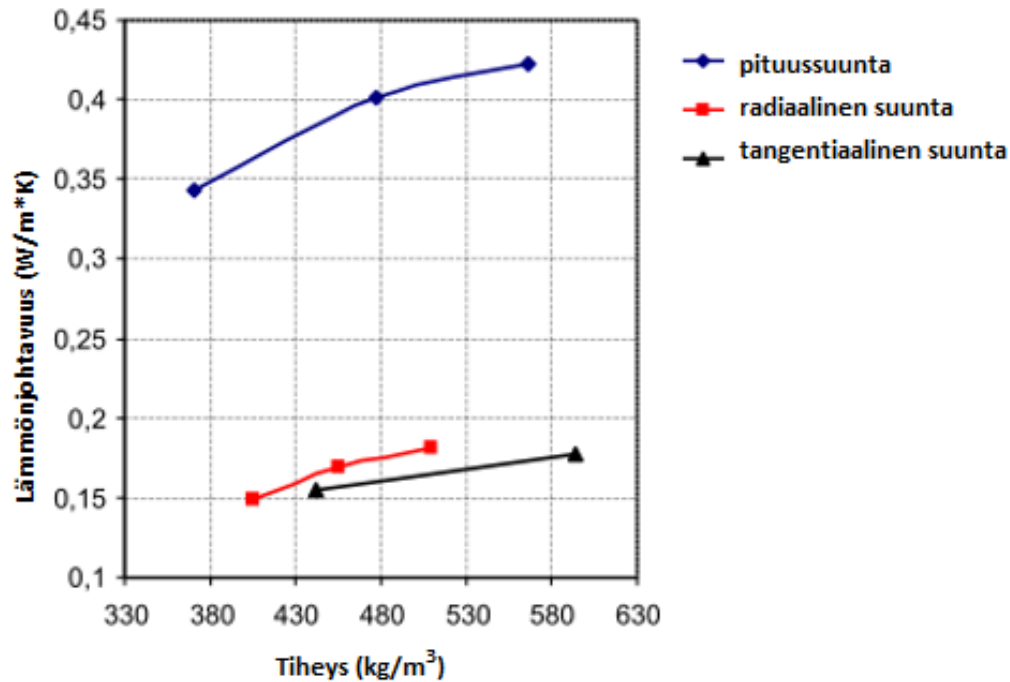
*Taulukko 2 Suomessa esiintyvien havu- ja lehtipuiden keskimääräisiä tiheyksiä. (Siikanen, U. 2008, s. 41.)*

		Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Havupuut</b>	Mänty	480
	Kuusi	440
	Kataja	500
<b>Lehtipuut</b>	Visakoivu	620
	Rauduskoivu	610
	Haapa	490
	Harmaaleppä	530
	Tervaleppä	510
	Tammi	690
	Saarni	690
	Vaahtera	700

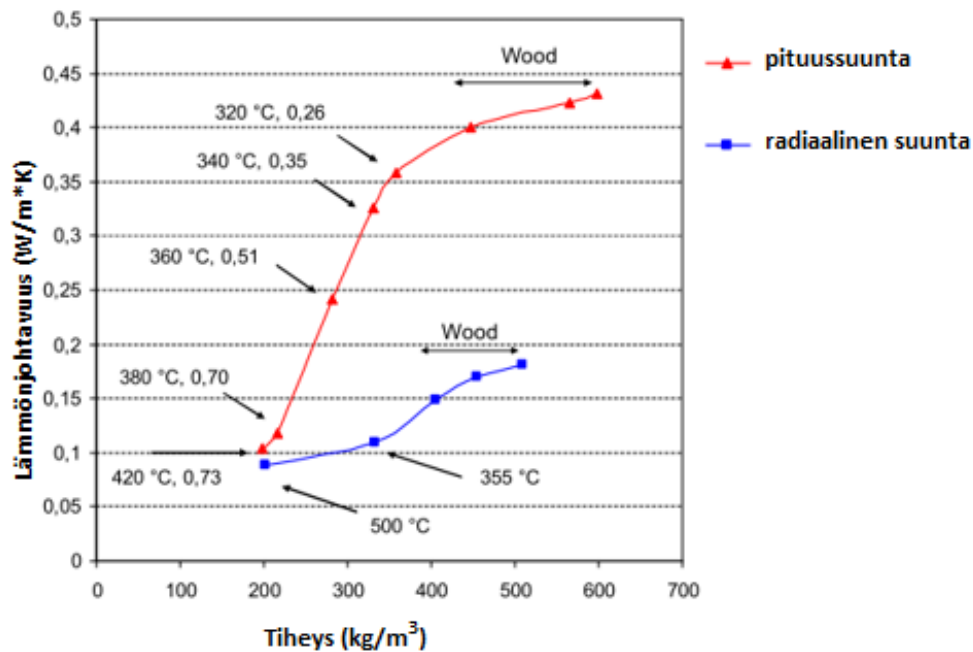


Kuva 1 Puun syiden suunnat. (Muokattu kuva, Kotlarewski, N et al. 2014, s 5787.)

Puun lämmönjohtavuuteen vaikuttaa voimakkaasti puun tiheys, kosteuspitoisuus, lämpötila sekä syiden suunta. Lämmönjohtavuus kasvaa tiheyden, lämpötilan ja kosteuspitoisuuden noustessa. Puun lämmönjohtavuus on keskimäärin kaksinkertainen pituussuunnassa verrattuna syiden kohtisuoraan suuntaan (radiaalisesti). Lämmönjohtavuus kasvaa keskimäärin 2,7 % kun puun sisältämä kosteus kasvaa 1 % verran. Lisäksi kuvasta 2 nähdään, että tiheydeltään raskaat puulajit johtavat lämpöä enemmän kuin kevyet. Kuvassa 3 on esitetty tiheyden ja lämpötilan vaikutusta koivun lämmönjohtavuuteen. (Siikanen, U. 2008, s. 44.)



Kuva 2 Koivun tiheyden vaikutus lämmönjohtavuuteen. (Muokattu kuva, Hankalin, V et al. 2009, s.10.)



Kuva 3 Lämpötilan ja tiheyden vaikutus lämmönjohtavuuteen. (Muokattu kuva, Hankalin, V et al. 2009, s.12.)

Puun lämpökapasiteettiin vaikuttaa myös puun tiheys, kosteus sekä lämpötila. Kosteuden lisääntyminen kasvattaa puun ominaislämpökapasiteettia, koska veden ominaislämpö on suurempi kuin puulla. (Hankalin, V et al. 2009, s.5.)

### 3 Puun palosuojaus

Markkinoilla on useita eri palosuoja-aineita, jotka toimivat ja vaikuttavat eri tavoin puun palo-ominaisuuksiin ja syttyvyyteen. Palosuoja-aineiden suoja perustuu fysikaalisiin ja kemiallisiin mekanismeihin. Osa palonestoaineista toimii yksin, osa taas parhaiten yhdessä muiden aineiden kanssa. (Hakkarainen et al. 2005, s. 17.)

Puun palamiseen ja pyrolyysiin voidaan vaikuttaa kuudella eri tavalla:

#### 1. Suojapinnan muodostaminen

Puun pinta voidaan käsitellä kerroksella, joka paisuu lämpötilan vaikutuksesta muodostaen hiilipitoista vaahtoa. Paisunut kerros hidastaa lämpötilan nousemista sekä rajoittaa pyrolyysikaasujen vapautumista ja hapen pääsyä kappaleen pinnalle. Tällaisia kerroksia saadaan aikaiseksi käyttämällä lämmön vaikutuksesta laajenevia huokoisia ja hiilipitoisia aineita, yleensä natriumsilikaatteja. (Rowell, R. et al. 2005, s. 141.)

Paisuissa suoja-aineissa käytetyt lisäaineet voidaan jakaa kolmeen ryhmään niiden käyttötymisen perusteella:

- Aine muodostaa hiiltä. (Sakkarosi, tärkkelys, polyolit)
- Aine parantaa suojaavaa paisuvaa pinnoitetta. (Melamiini, guanidiini, disyandiamidi)
- Aine nopeuttaa veden haihtumista sekä esteröitymistä. (Fosfaatit, boorin yhdisteet)

(Hakkarainen et al. 2005, s. 19.)

Tällaiset pinnoiteaineet ovat yleensä kalliita ja muuttavat puun ulkonäköä. Lisäksi pinnoiteaineet soveltuvat pääosin vain sisätiloihin käytettäväksi. (Hakkarainen et al. 2005, s. 19.)

#### 2. Lämmönjohtavuuteen vaikuttaminen

Puun lämpöominaisuuksia muuttamalla voidaan vaikuttaa liekin leviämiseen ja puun syttyvyyteen. Ominaisuuksia voidaan muuttaa lisäämällä puuhun rakenneosia tai aineita, joilla on korkea lämpöhitaus sekä terminen diffuusiokerroin. Lisätyt rakenneosat tai aineet hidastavat lämmön nousua puun sisällä. Lisäksi rakenneosat sisältävät paljon kristallisoitunutta vettä, mikä kerää palamisesta syntyvää lämpöä hidasten puun lämpenemistä ja pyrolyysireaktioita. Käytetyimpiä rakenneosia ovat erilaiset metalliseokset. (Hakkarainen et al. 2005, s. 19, Rowell, R. et al. 2005, s. 141.)

#### 3. Palokaasujen laimentaminen

Palosuoja-aineissa käytetään esimerkiksi disyandiamidia, booraksia ja ureaa, jotka vapauttavat suuria määriä palamattomia kaasuja pyrolyysiä matalimmassa lämpötilassa. Palamattomat kaasut heikentävät myös palavien kaasujen määrää puun pinnalla, jolloin puun sytyminen hidastuu. Lisäksi suoja-aineista vapautuvat palamattomat kaasut heikentävät hapen pääsyä puun pinnalle. (Rowell, R. et al. 2005, s. 141.)

#### 4. Vapaat radikaalit

Palosuoja-aineen sisältämät lisäaineet kuten bromi tai kloori vapauttavat höyrystymispisteissään vapaita radikaaleja inhibiittoreita, jotka pyrkivät katkaisemaan palamisen ketjureaktion kaasufaasissa.

#### 5. Hiiltymisen lisääminen ja haihtuvuuden vähentäminen

Palosuoja-aineiden sisältämät kemikaalit, yleensä fosforipohjaisia aineita, kiihdyttävät hiilen muodostumista, vähentävät palavien, haihtuvien kaasujen muodostumista sekä alentavat pyrolyysiin vaatimaa lämpötilaa. Kemikaalien palokaasuja vähentävä toiminta perustuu levoglukosaan muodostumisen rajoittamiseen. Lisäksi lämpötilan noustessa fosforipohjaiset aineet muodostavat fosforihappoa, joka kondensoituessaan muodostaa pyrofosfaattia ja vettä. Muodostunut vesi heikentää hapettumisen tapahtumista muodostaen vähemmän palokaasuja ja pyrofosfaatti kiihdyttää selluloosaan kuivumista mikä johtaa nopeampaan hiiltymiseen. Muodostunut hiilikerros rajoittaa hapen pääsyä paloreaktioihin sekä muodostaa lämmöltä suojaavan kerroksen puulle. Reaktiosta syntyvä vesi myös viilentää puuta. (Lowden, A. & Hul, T. 2013, s. 9-10, Rowell, R. et al. 2005, s. 138-139.)

#### 6. Haihtuvien yhdisteiden lämpösisällön alentaminen

Palosuoja-aineiden kemikaalit alentavat palavien, haihtuvien yhdisteiden lämpösisältöä. Lämpösisällön vähentyminen tapahtuu kun puun hiilentuotto lisääntyy ja haihtuvien yhdisteiden määrä vähenee. Reaktioiden tapahtuessa alemmissa lämpötiloissa, saattaa reaktioiden järjestys mennä sekaisin, mikä vaikuttaa koko ketjun reaktiolämpöön. Reaktiolämmön muuttuessa palamisen eri vaiheet saattavat alkaa myöhemmin tai jäädä kokonaan pois, esimerkiksi jälkihehkunta. (Nikolaeva, M. & Kärki, T. 2011. s.315, Rowell, R. et al. 2005, s. 142.)

### 3.1 Palosuojakäsittelyt

Puun palosuojaus voidaan toteuttaa kolmella eri tavalla:

#### 1. Puu kyllästetään palosuoja-aineella ylipaineen ja tyhjiön avulla

Paineekyllästys on käytetyin ja luotetuin tapa puutavaran palosuojaamiseen.

Paineekyllästys-prosessi koostuu viidestä vaiheesta:

1. Tyhjiön avulla puun soluista poistetaan ilma.
2. Kyllästyskammio täytetään palosuoja-aineella.
3. Palosuoja-aine kyllästetään puuhun ylipaineen avulla.
4. Kyllästyskammio tyhjennetään palo-aineesta.
5. Ylimääräinen kylläste poistetaan puusta tyhjiön avulla.

Osa puulajeista on vaikeita kyllästyä, jolloin ne esikäsitellään palosuoja-aineen imeytymisen varmistamiseksi. Tällaisia esikäsiteltyjä ovat viiltojen tai reikien teko puuhun sekä höyrystäminen, jolla saadaan puun solut auki. Palosuoja-aineen säilyvyys puussa riippuu käytetystä aineesta. Myös kyllästyksellä on vaikutusta aineen kestävyyspuussa.

Koska palosuoja-aineet ovat yleensä hygroskooppisia, käsitellyt puut kuivutetaan painekylästämisen jälkeen valvotusti, jotta muodonmuutoksilta vältytään. (Hakkarainen et al. 2005, s. 21.)

## **2. Puun pinnat käsitellään palosuoja-aineella**

Pintakäsittelyssä puun pinta käsitellään erilaisilla pinnoiteaineilla kuten maaleilla tai lakkoilla. Yleensä käsittely imeytyy alle millimetrin syvyyteen puuhun ja on paksuudeltaan millimetrien sadasosia. Pintakäsittely soveltuu hyvin jo olemassa oleville tai tilapäisille rakennuksille tai isoille rakennusosille.

Pintakäsittelyaineita on kahden tyyppisiä: Paisuvia ja ei paisuvia. Paisuvat aineet ovat yleensä maaleja ja lakkoja, jotka muodostavat näkyvän pinnan tuotteen päälle. Ei-paisuvat aineet ovat usein kuultavia lakkoja.

Paisuvia maaleja käytetään yleisesti parantamaan rakenteiden kestoja palotilanteissa. Palotilanteessa pinnan altistuttua lämmölle, pintakäsittely turpoaa muodostaen suojaavan pinnan, joka estää hapen ja liekkien pääsyn kappaleen pinnalle.

Paisuvien maalien levitysmäärä on melko suuri, keskimäärin  $500\text{g/m}^2$ , mikä vastaa noin 0,1mm kerrosta puun pinnalla. Lisäksi maalit ovat usein hyvin hygroskooppisia eli valmiit pinnat ovat hyvin alttiita kosteudelle. Usein paisuvia suoja-aineita saakin käyttää vain sisätiloissa ja lisäksi ne vaativat vielä suojaavan pintakäsittelyn toisella aineella.

Ei-paisuvat maalit vaikuttavat palon pyrolyysiin pääosin kemiallisin menetelmin, vaikka niillä on myös paisuvien maalien kaltaisia ominaisuuksia. (Hakkarainen et al. 2005, s. 21-22.)

## **3. Palosuoja-aine lisätään tuotteeseen valmistusprosessin aikana**

Lisäksi valmistusvaiheessa voidaan lisätä palosuoja-aineita esimerkiksi puukuitulevyn puristusmassaan, jolloin valmistettava tuote on aina tasa-aineinen ja sillä on homogeeniset palosuojaominaisuudet. Puristettavissa tuotteissa palosuoja-aineen lisäys valmistusmassaan heikentää mekaanisia ja pinnan ominaisuuksia. (Hakkarainen et al. 2005, s. 23.)

## 4 Puun paloluokitus ja palomääräykset

### 4.1 Rakennustarvikkeiden paloluokitus

Suomen rakennusmääräyskokoelman E1 mukaan rakennustuotteiden paloluokituksen määrittämiseen käytetään EN-standardeja. Euroluokat on määritellyt EU:n komission päätöksessä 2000/147/EY sekä laajemmin eurooppalaisessa standardissa EN 13501–1. Luokkavaatimukset eri käyttökohteisiin määritellään kuitenkin kansallisesti. (Weckman, 2002 s.541.)

Rakennustarvikkeiden paloteknistä käyttäytymistä koskevassa luokituksessa tutkitaan tuotteiden osallistumista palon eri vaiheisiin. Tuotteiden palo-ominaisuuksia kuten tuotteen palavuutta, syttymisherkkyyttä, palonlevittämisominaisuuksia sekä savunmuodostusta koskevia ominaisuuksia voidaan tutkia kokeellisesti. (Weckman, 2002 s. 541.)

Standardin EN 13501–1 mukainen luokitusjärjestelmä perustuu huonepaloon, josta palo syttyttyään leviää ja voi johtaa lopulta lieskahdukseen. Standardissa tällaista palotilannetta kutsutaan viitepalotilanteeksi, joka voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen:

1. Rajoitettu osa rakennustuotteesta syttyy pienen liekin vaikutuksesta.
2. Palo leviää ja kasvaa, mikä lopulta johtaa huonetilan leimahtamiseen. Kyseistä tilannetta jäljitellään siten, että altistetaan seinäpinnat nurkkaan sijoitetun yksittäisen palavan kohteen aiheuttamalle lämpösäteilylle sekä liekeille.
3. Lieskahduksen jälkeen kaikki palavat rakennustarvikkeet osallistuvat palamiseen. (Weckman 2002, s. 542.)

Rakennustuotteet jaetaan taulukon 3 mukaisesti seitsemään paloluokkaan, joiden merkinnät ovat A1, A2, B, C, D, E ja F. Näistä A1-luokkaan kuuluva tuote ei myötävaikuta lainkaan palamiseen ja F-luokan tuote ei joko täytä E-luokalle asetettuja vaatimuksia tai sen palo-ominaisuuksia ei tunneta. Lisäksi luokissa A2–D käytetään lisämääreitä s1, s2 ja s3, jotka ilmaisevat tuotteen savunmuodostusominaisuuksia sekä d0, d1 ja d2, jotka koskevat palavien pisaroiden muodostumista. Suomessa on käytössä seuraavat viisi yhdistelmää muille rakennustuotteille kuin lattianpäällysteille: A1; A2-s1, d0; B-s1, d0; C-s2, d1 ja D-s2, d2. (Weckman 2002, s. 542.)

Käsittlemättömän puun paloluokka on yleensä D, mikäli kappaleen paksuus on vähintään 9 mm ja tiheys vähintään 400 kg/m<sup>3</sup>. Kuten kappaleen 4.2 taulukosta 5 nähdään, sisäpuolisten pintojen vaatimuksena on usein vähintään C-luokan paloluokitus. Palosuojauksella puun ominaisuuksia voidaan parantaa niin, että tuote saa C- tai B-luokan paloluokituksen. Savuntuottoluokka on yleisesti s1 tai s2 riippuen palosuojauksessa käytetyistä menetelmistä tai kemikaaleista. (Nurmi et al. 2010, s.9.)



Taulukko 3 Paloluokkien viitepalotilanteet. (Weckman 2003, s.542.)

Luokka	Kuvaus
<b>F</b>	Tuotteet, joiden palotekninen käyttäytyminen ei ole määritelty tai, jotka eivät täytä luokkien A1, A2, B, C, D tai E vaatimuksia.
<b>E</b>	Tuotteet, jotka lyhyen ajan kestävät pienen liekin aiheuttaman rasituksen ilman, että palo olennaisesti leviää.
<b>D</b>	Tuotteet, jotka täyttävät luokan E vaatimukset ja jotka myös kestävät pienen liekin rasituksen kauemmin ilman, että palo olennaisesti leviää. Lisäksi, altistettaessa tuotteet yksittäiselle palavalle kohteelle, niistä vapautuu lämpöä hitaasti ja rajoitetusti.
<b>C</b>	Kuten luokka D, mutta ankarammin vaatimuksin. Lisäksi, altistettaessa tuotteet yksittäiselle palavalle kohteelle, palaminen pinnassa saa levitä vain rajoitetusti.
<b>B</b>	Kuten luokka C, mutta ankarammin vaatimuksin.
<b>A2</b>	Tuotteet, jotka täyttävät samat vaatimukset kuin luokan B tuotteet standardin EN 13823 mukaisessa yksittäisen palavan esineen testissä. Lisäksi altistettaessa tuotteet täysin kehittyneelle palolle, ne eivät saa olennaisesti lisätä palokuormaa tai palon leviämistä.
<b>A1</b>	Luokan A1 tuotteet eivät osallistu palamiseen missään palon vaiheessa, mukaan lukien täysin kehittynyt palo. Sen vuoksi näiden tuotteiden oletetaan automaattisesti täyttävän kaikkien alempien luokkien vaatimukset.
Lisäluokka	Kuvaus
<b>s3</b>	Savuntuotolle ei ole asetettu rajoituksia.
<b>s2</b>	Kokonaissavuntuotto samoin kuin savuntuoton kasvunopeus on rajoitettu.
<b>s1</b>	Täyttää ankarammat vaatimukset kuin s2.
<b>d2</b>	Ei rajoituksia palavien pisaroiden tai osien muodostumisen suhteen.
<b>d1</b>	Palavat pisarat tai osat eivät saa palaa tiettyä aikaa kauemmin.
<b>d0</b>	Palavia pisaroita tai osia ei saa esiintyä.

Taulukossa 4 on esitelty rakennustuotteiden paloluokituksiin vaaditut kokeet sekä luokitusperusteet.

Taulukko 4 Vaaditut testit ja niiden arvot paloluokituksille. (EN 13501-1, s. 66.)

Luokka	Koemenetelmä	Luokitusperusteet	Lisäluokitus
<b>A1</b>	EN ISO 1182 <sup>a</sup> ja	$\Delta T \leq 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ja $\Delta m \leq 50 \text{ \%}$ ; ja $t_f = 0$ (eli ei jatkuvaa palamista)	–
	EN ISO 1716	$PCS \leq 2,0 \text{ MJ/kg}^a$ ja $PCS \leq 2,0 \text{ MJ/kg}^{b,c}$ ja $PCS \leq 1,4 \text{ MJ/m}^2^d$ ja $PCS \leq 2,0 \text{ MJ/kg}^e$	–
<b>A2</b>	EN ISO 1182 <sup>a</sup> tai	$\Delta T \leq 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ja $\Delta m \leq 50 \text{ \%}$ ; ja $t_f \leq 20 \text{ s}$	–
	EN ISO 1716 ja	$PCS \leq 3,0 \text{ MJ/kg}^a$ ja $PCS \leq 4,0 \text{ MJ/m}^2^b$ ja $PCS \leq 4,0 \text{ MJ/m}^2^d$ ja $PCS \leq 3,0 \text{ MJ/kg}^e$	–
	EN 13823	$FIGRA \leq 120 \text{ W/s}$ ja $LFS < \text{koekappaleen reuna ja}$ $THR_{600s} \leq 7,5 \text{ MJ}$	Savuntuotto <sup>f</sup> ja Palavia pisaroita tai osia <sup>g</sup>
<b>B</b>	EN 13823 ja	$FIGRA \leq 120 \text{ W/s}$ ja $LFS < \text{koekappaleen reuna ja}$ $THR_{600s} \leq 7,5 \text{ MJ}$	Savuntuotto <sup>f</sup> ja Palavia pisaroita tai osia <sup>g</sup>
	EN ISO 11925-2 <sup>l</sup> : Altistus = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm 60 s:n kuluessa}$	
<b>C</b>	EN 13823 ja	$FIGRA \leq 250 \text{ W/s}$ ja $LFS < \text{koekappaleen reuna ja}$ $THR_{600s} \leq 15 \text{ MJ}$	Savuntuotto <sup>f</sup> ja Palavia pisaroita tai osia <sup>g</sup>
	EN ISO 11925-2 <sup>l</sup> : Altistus = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm 60 s:n kuluessa}$	
<b>D</b>	EN 13823 ja	$FIGRA \leq 750 \text{ W/s}$	Savuntuotto <sup>f</sup> ja Palavia pisaroita tai osia <sup>g</sup>
	EN ISO 11925-2 <sup>l</sup> : Altistus = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm 60 s:n kuluessa}$	
<b>E</b>	EN ISO 11925-2 <sup>l</sup> : Altistus = 15 s	$F_s \leq 150 \text{ mm 20 s:n kuluessa}$	Palavia pisaroita tai osia <sup>h</sup>
<b>F</b>	Käyttäytymistä ei ole määritelty		

<sup>a</sup> Kun kyseessä ovat homogeeniset tuotteet ja epähomogeenisten tuotteiden oleelliset komponentit.

<sup>b</sup> Kun kyseessä ovat epähomogeenisten tuotteiden vähämerkityksiset ulkopinnan komponentit.

<sup>c</sup> Vaihtoehtoisesti vähämerkityksinen ulkopinnan komponentti, jonka  $PCS \leq 2,0 \text{ MJ/m}^2$ , mikäli tuote täyttää seuraavat vaatimukset standardin EN 13823 kokeessa:  $FIGRA \leq 20 \text{ W/s}$  ja  $LFS < \text{näytteen reuna ja}$   $THR_{600s} \leq 4,0 \text{ MJ}$  ja s1 sekä d0.

<sup>d</sup> Kun kyseessä ovat epähomogeenisten tuotteiden vähämerkityksiset sisäiset komponentit.

<sup>e</sup> Koskee tuotetta kokonaisuutena.

<sup>f</sup> Koemenetelmän kehitystyön viimeisessä vaiheessa on savunmittausjärjestelmään tehty muutoksia, joiden vaikutukset edellyttävät lisäselvityksiä. Tästä voi aiheutua muutoksia savuntuoton arviointiin käytettyihin raja-arvoihin ja/tai parametreihin.

<sup>g</sup>  $s1 = SMOGRA \leq 30 \text{ m}^2/\text{s}^2$  ja  $TSP_{600s} \leq 50 \text{ m}^2$ ;  $s2 = SMOGRA \leq 180 \text{ m}^2/\text{s}^2$  ja  $TSP_{600s} \leq 200 \text{ m}^2$ ;  $s3 = \text{ei s1 eikä s2}$

<sup>h</sup>  $d0 = \text{Ei palavia pisaroita tai osia standardin EN 13823 kokeessa 600 s:n kuluessa.}$

$d1 = \text{Pisaroiden tai osien palamisen kesto aika enintään 10 s standardin EN 13823 kokeessa 600 s:n kuluessa.}$

$d2 = \text{ei d0 eikä d1.}$

Paperin syttymisestä standardin EN ISO 11925-2 kokeessa seuraa d2-luokitus.

<sup>i</sup> Hyväksytty = paperi ei syty (ei lisäluokitusta).

Hylätty = paperi syttynyt (d2-luokitus).

<sup>j</sup> Pintasyttytyksessä ja myös reunasyttytyksessä, jos se on tarkoituksenmukaista tuotteen lopullisen käyttösovelluksen kannalta.

## **4.2 Suomen rakennusmääräyskokoelman vaatimukset sisäverhouksille**

Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa E1 määritellään rakennusten palovaatimukset. E1:n mukaan rakennus luokitellaan kolmeen paloluokkaan: P1, P2 ja P3.

Paloluokkaan P1 kuuluvien rakennusten rakenteiden tulee kestää palossa sortumatta. P1 luokka ei aseta rajoituksia kokoon ja henkilömäärään. P2 paloluokan rakennuksien kantavien rakenteiden vaatimukset voivat olla P1 luokkaa vaatimattomampia. Riittävä paloturvallisuus taataan paloturvallisilla pintaosilla sekä paloturvallisuutta lisäävillä laitteilla. Lisäksi P2 luokassa rakennuksen kokoa ja sallittua henkilömäärää on rajoitettu. Paloluokkaan P3 rakennusten kantaville rakenteille ei ole palokestävyyteen liittyviä vaatimuksia. Tarvitava paloturvallisuus taataan säätelämällä henkilömäärää sekä rakennuksen kokoa. Paloluokista on mahdollista poiketa sekä rakennuksen eri osat voivat kuulua eri paloluokkiin. (E1 2011, s.10-11.)

Sisäpuolisille pinnoille kuten seinät, sisäkatot ja lattiat annetaan rakennusmääräyskokoelmassa tietyt luokkavaatimukset, jotka perustuvat tuotteiden paloluokituksiin. Taulukossa 5 on esitetty rakennuksen paloluokituksen perusteella määräytyvä vaatimusluokka seinille, katoille ja lattioille.

Taulukossa 5 esitettyihin luokkavaatimuksiin on mahdollista saada lievennyksiä. Sisäpinnoille voidaan sallia yhtä pääluokkaa pienemmät vaatimukset mikäli sisäpintoja sisältävän osaston käyttötapa huomioiden, syttymisen ja palon leviämisen riski on tavallista vähäisempää tai poistumismahdollisuudet osastolta ovat erityisen hyvät. Sisäpintojen vaatimuksille voidaan myös hakea lievennyksiä tilan ollessa varustettu vähintään SFS-EN 12845-standardin OH-luokan vaatimustason mukaisella, automaattisella sammutuslaitteistolla. Lisäksi lievennyksien harkinnassa huomioidaan tapauskohtaisesti rakennustarvikkeen savuntuotto ja palavien pisaroiden tuottaminen. (E1 2011. s.21-22.)

Lisäksi P2-luokan rakennuksissa joudutaan sisäpinnat verhoamaan vähintään K<sub>2</sub> 10-luokan suojaverhouksella, mikäli verhouksen takana olevaa rakennetta ei ole tehty B-s1, d0-luokan tarvikkeista. Suojaverhouksen tehtävä on rajoittaa palon kehittymistä tilassa, jossa rakennusosissa käytetyt tarvikkeet saattavat osallistua merkittävästi paloon ja sen kehittymiseen. Yli 3 kerroksissa P2-luokan rakennuksissa suojaverhouksen tulee olla A2-s1, d0-luokan tarvikkeista tehty, jos takana oleva rakenne on tehty tarvikkeista, jotka eivät ole vähintään A2-s1, d0-luokkaa. Lisäksi yli 5 kerroksissa P2-luokan rakennuksissa vaaditaan K<sub>2</sub> 30-luokkainen suojaverhaus. (E1 2011, s.22.)

Taulukko 5 Sisäpuolisten pintojen luokkavaatimukset. (E1 2011, s.21.)

Käyttötapa	Kohde	Rakennuksen paloluokka		
		P1	P2	P3
Asunnot	seinät ja katot lattiat	D-s2, d2 <sup>1)</sup> -	B-s1, d0 <sup>2)</sup> -	D-s2, d2 <sup>1)</sup> -
Majoitustilat	seinät ja katot lattiat	D-s2, d2 -	B-s1, d0 -	D-s2, d2 -
Hoitolaitokset	seinät ja katot lattiat	B-s1, d0 D <sub>FL</sub> -s1	B-s1, d0 D <sub>FL</sub> -s1	D-s2, d2 -
Kokoontumis- ja liiketilat				
- palokuorma alle 600 MJ/m <sup>2</sup> ja - pinta-ala on ≤ 300 m <sup>2</sup>	seinät ja katot lattiat	D-s2, d2 -	D-s2, d2 -	D-s2, d2 -
- pinta-ala on yli 300 m <sup>2</sup>	seinät ja katot lattiat	C-s2, d1 -	C-s2, d1 -	D-s2, d2 -
- palokuorma ≥ 600 MJ/m <sup>2</sup>	seinät ja katot lattiat	B-s1, d0 D <sub>FL</sub> -s1	B-s1, d0 D <sub>FL</sub> -s1	B-s1, d0 -
Työpaikkatilat	seinät ja katot lattiat	D-s2, d2 <sup>1)</sup> -	B-s1, d0 <sup>2)</sup> -	D-s2, d2 <sup>1)</sup> -
Tuotanto- ja varastotilat				
- palovaarallisuusluokka 1	seinät katot lattiat	D-s2, d2 D-s2, d2 D <sub>FL</sub> -s1	D-s2, d2 B-s1, d0 D <sub>FL</sub> -s1	D-s2, d2 D-s2, d2 -
- palovaarallisuusluokka 2	seinät ja katot lattiat	B-s1, d0 A2 <sub>FL</sub> -s1	B-s1, d0 A2 <sub>FL</sub> -s1	B-s1, d0 A2 <sub>FL</sub> -s1
Autokorjaamot ja -huoltamot, autosuojat (autosuojissa on lie- vennysmahdollisuus RakMK osan E4 mukaisesti)	seinät ja katot lattiat	B-s1, d0 A2 <sub>FL</sub> -s1	B-s1, d0 A2 <sub>FL</sub> -s1	B-s1, d0 A2 <sub>FL</sub> -s1
Ullakot ja kellarit				
- käyttöullakot	lattiat	A2 <sub>FL</sub> -s1	D <sub>FL</sub> -s1	D <sub>FL</sub> -s1
- käyttämättömät ullakot sekä matalat ullakotilat ja ontelot	yläpohjan yläpinta seinät ja katot	B-s1, d0 C-s2, d1	B-s1, d0 B-s1, d0	- D-s2, d2
- kellaritilat yleensä	lattiat	D <sub>FL</sub> -s1	D <sub>FL</sub> -s1	D <sub>FL</sub> -s1
- teknisen huollon tilat	seinät ja katot lattiat kattilahuoneen lattiat	B-s1, d0 D <sub>FL</sub> -s1 A2 <sub>FL</sub> -s1	B-s1, d0 D <sub>FL</sub> -s1 A2 <sub>FL</sub> -s1	B-s1, d0 D <sub>FL</sub> -s1 A2 <sub>FL</sub> -s1
Uloskäytävät	seinät ja katot lattiat	A2-s1, d0 <sup>3)</sup> D <sub>FL</sub> -s1	A2-s1, d0 D <sub>FL</sub> -s1	B-s1, d0 D <sub>FL</sub> -s1
Sisäiset käytävät majoitus- ja työpaikkatiloissa	seinät ja katot lattiat	B-s1, d0 D <sub>FL</sub> -s1	B-s1, d0 D <sub>FL</sub> -s1	B-s1, d0 -
Saunat	seinät ja katot lattiat	D-s2, d2 -	D-s2, d2 -	D-s2, d2 -
<b>Taulukon merkinnät:</b>	-	= ei vaatimusta		
<b>Taulukon huomautukset:</b>	<sup>1)</sup> <sup>2)</sup> <sup>3)</sup>	Vähäisiä osia seinäpinnoista voidaan verhota luokkiin kuulumattomilla tarvikkeilla. Vähäisiä osia seinäpinnoista voidaan verhota D-s2, d2-luokan tarvikkeilla. Koskee myös suojaverhottuja seinä. Seinä- ja kattopinnoista voidaan verhota vähintään D-s2, d2-luokan tarvikkeilla, kun tila on varustettu tarkoitukseen sopivalla automaattisella sammutuslaitteistolla. Vähäisiä osia seinä- ja kattopinnoista voidaan verhota B-s1, d0-luokan tarvikkeilla.		

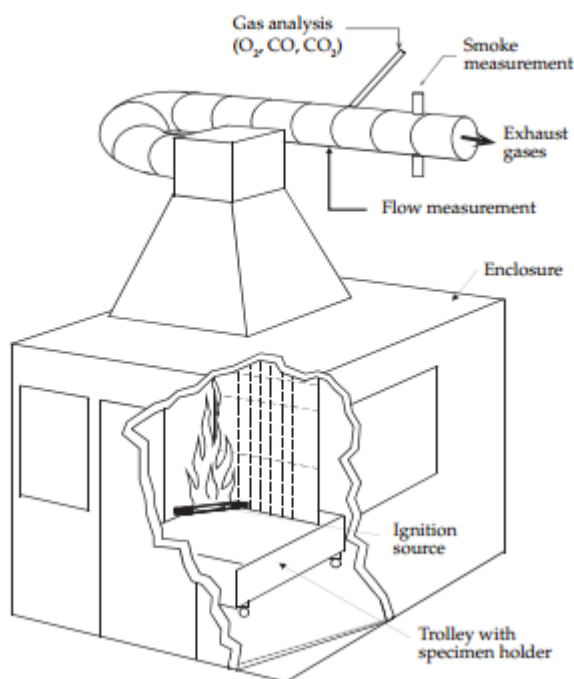
Kaikki Suomen rakennusmääräyskokoelman osat uudistetaan vuoden 2017 loppuun mennessä. E1-kokoelman uudistusehdotelman suurimmat muutokset koskevat yli 140m korkeisten rakennusten paloturvallisuutta sekä uutta P0-paloluokkaa. P0-paloluokka perustuu siihen, että rakennus tai sen osa on kokonaan suunniteltu oletetun palokehityksen perusteella. Sisäpuolisten pintojen osalta muutoksia on tulossa palovaatimuksista saataviin lievennyksiin ja tilojen käyttötarkoitusten tarkennuksiin. Lisäksi P2-paloluokan vaatimuksia koskien suojaverhouksia selkeytetään. (Jantunen, J. 2016, s. 9, 19-20.)

## 5 Palo-ominaisuuksien tutkiminen

### 5.1 SBI-koe

Standardin EN 13823 mukaiseen SBI-kokeeseen kuuluu testihuone, testilaite, savukaasujärjestelmä sekä mittauslaitteisto. Koekappale muodostuu kahdesta seinäkkeestä, lyhyestä ja pitkästä. Lyhyen seinäkkeen mitat ovat 495x1500mm ( $\pm 5$  mm) ja pitkän 1000x1500( $\pm 5$  mm). EN 13923 Standardin mukaisessa kokeessa kappaleen suurin sallittu paksuus on 200 mm. Koekappaleet tehdään ja kiinnitetään loppukäytön asennustavan mukaisesti koehuoneeseen. Koekappaleen asennus- ja kiinnitystapa vaikuttavat koetuloksiin määräten missä loppukäytön olosuhteissa saatu luokitus on voimassa. (SFS EN 13823. s.14.)

SBI-kokeessa tutkitaan kappaleen lämmöntuottoa, liekinleviämistä, savunmuodostusta sekä putoilevien pisaroiden esiintymistä. Koetilanteessa kahdesta pystysuorasta seinäkkeestä muodostuvan kappaleen alanurkkaan sijoitetaan propaaniaasupoltin, minkä liekille koekappaleen alanurkka alistetaan. Propaaniaasupoltin tuottaa lämpöä 30,7( $\pm 2$  kW) teholla. (SFS EN 13823. s.14-18.)



Kuva 4 SBI-kokeessa käytettävä laitteisto. (Mierlo R. & Sette B. 2005 s. 193.)

Koekappaleita mitataan 20 minuutin ajan. SBI-kokeessa mitattavia parametreja ovat FIGRA<sub>0,2MJ/0,4M</sub> (palonkehityksen kasvunopeus THR-kynnysarvoilla 0,2/0,4MJ), LFS (si-vuttainen palon leviäminen), THR<sub>600s</sub> (kokonaislämmöntuotto 600 sekunnin ajalta), SMO- GRA (savuntuoton kasvunopeus) ja TSP<sub>600s</sub> (kokonaissavuntuotto 600 sekunnin ajalta). (SFS EN 13823 s.28-33.)

Taulukossa 6 on eritelty SBI-kokeen luokituskriteerit lämmön- ja savutuoton perusteella. Mikäli tuotteelle haetaan A2 tai B-luokkaa, käytetään  $FIGRA_{0,2MJ}$ -arvoja. C ja D-luokille käytetään  $FIGRA_{0,4MJ}$ -arvoja. (SFS-EN 13501-1, s.18.)

*Taulukko 6 Paloluokkien vaatimukset. (EN 13501-1, s. 66.)*

Luokka	FIGRA	THR600s	LFS
A2 ja B	$< 120 \text{ W/s}$	$< 7,5 \text{ MJ}$	Liekki ei saa levitä koekappaleen leveään sivun ulkoreunaan
C	$< 250 \text{ W/s}$	$< 15 \text{ MJ}$	Liekki ei saa levitä koekappaleen leveään sivun ulkoreunaan
D	$< 750 \text{ W/s}$	ei vaatimusta	ei vaatimusta

*Taulukko 7 Savuluokkien vaatimukset. (EN 13501-1, s. 66.)*

Luokka	SMOGR	TSP <sub>600s</sub>
s1	$\leq 30 \text{ m}^2/\text{s}^2$	$\leq 30 \text{ m}^2$
s2	$\leq 30 \text{ m}^2/\text{s}^2$	$\leq 30 \text{ m}^2$
s3	ei vaatimusta	ei vaatimusta

SBI-kokeissa tulee tiettyjen raja-arvojen täyttyä, että FIGRA-arvoja voidaan laskea. Edellytetyt raja-arvot  $FIGRA_{0,2mj}$ - ja  $FIGRA_{0,4mj}$ -arvojen laskentaa varten on esitetty alla olevissa lausekkeissa:

$FIGRA_{0,2mj}$  raja-arvot:

$$HRR_{av}(t) > 3 \text{ kW ja } THR(t) > 0.2 \text{ MJ sekä aika } 300 \text{ s} < t < 1500 \text{ s} \quad (5.1)$$

$FIGRA_{0,4mj}$  raja-arvot:

$$HRR_{av}(t) > 3 \text{ kW ja } THR(t) > 0.4 \text{ MJ sekä aika } 300 \text{ s} < t < 1500 \text{ s}, \quad (5.2)$$

missä  $HRR_{av}(t)$  on 30 sekunnin keskiarvo kappaleen lämpötuotosta  
 $THR(t)$  on kappaleen kokonaislämmöntuotto ajanhetkellä t.

FIGRA-indeksien vaatimat raja-arvot ovat määritetty, jotta voidaan välttää todella pienten tai aikaisin esiintyvien korkeiden lämmöntuottojen aiheuttamia epärealistisia FIGRA-arvoja. Lisäksi kokonaislämmöntuotolla huomioidaan tuotteet, joiden lämmöntuotto on matala pitkällä aikavälillä. (Sundström, B. 2007, s. 5-8.)

## 5.2 Kartiokolorimetrikoe

Kartiokolorimittaus perustuu standardiin ISO 5660. Lisäksi Yhdysvalloissa on käytössä ASTM E 1354 standardiin perustuva vastaava koe. Testissä koekappale altistetaan ulkopuoliselle lämpösäteilylle. Kartiokolorimetrikoe perustuu siihen, että palon aikana vapautunut lämpöenergia on verrannollinen käytetyn hapen määrään. Näytteestä voidaan tutkia lämmöntuoton kehittymistä, syttymiseen kulunut aika, palamisesta johtuvaa massahäviötä sekä savuntuottoa. (SFS-ISO 5660-1 s.1.)

Koekappaleen pinta-ala tulisi olla 100 x 100 mm kokoinen. Kappaleen paksuus saa olla korkeintaan 50 mm. Lisäksi kappaleiden kosteusvaihtelun vakiinnuttamiseksi pitää koekappaleiden tasaantua 23(±2):ssa °C. Tasaannutusvaiheessa suhteellisen kosteuden tulee olla 50(±5) %. (SFS-ISO 5660-1 s.9-11.)

Kartiokalorimetrikokeessa koekappaleet altistetaan 10-100 kW/m<sup>2</sup> tehoiselle lämpösäteilylle. Lämpösäteilyn vaikutuksesta kappaleesta alkaa syntymään kaasuja, jotka sytytetään palamaan erillisellä kipinäsytyttimellä. Syntyvistä palokaasuista voidaan mitata hapen, hiilidioksidin sekä -monoksidin konsentraatiot sekä savuntiheys. Lisäksi testin aikana tarkastellaan havaittavissa olevia muutoksia koekappaleessa, esimerkiksi turpoamista, halkeilua tai sulamista. (SFS-ISO 5660-1 s.16-22.)

Koekappaleen reunat ja pohja peitetään alumiinifoliolla niin, että folion kirkas puoli tulee koekappaleeseen päin. Koekappale asetetaan kappalepidikkeeseen, mikä sijoitetaan lämpösäteilijän alapuolella olevaan vaa'alle. Tämän jälkeen koekappaleen päälle asetetaan kipinäsytytin. Testi alkaa kun säteilykilpi avataan. Koekappaleen syttymistä seurataan ja sen syttyä, kipinäsytytin siirretään pois kappaleen päältä. Jos liekit sammuvat mittauksen aikana, asetetaan kipinäsytytin koekappaleen päälle uudestaan jäljellä olevan testin ajaksi. (SFS-ISO 5660-1 s.16-17.)

Standardin mukainen koe voidaan lopettaa, mikäli koekappale ei ole syttynyt 30 minuutissa, palon syttymisestä on kulunut 32 minuuttia tai jos koekappaleen massa on hävinnyt kokonaan. ISO 5660-1 standardin mukaisessa koetilanteessa poltetaan 3 koekappaletta, joiden 180 sekunnin lämmöntuottoarvoja vertaillaan keskenään. Näiden arvojen erojen ollessa yli 10 % 180 sekunnin kohdalla, tulee testata uusi 3 näytteen testaussarja. (SFS ISO 5660-1. s.16-17.)

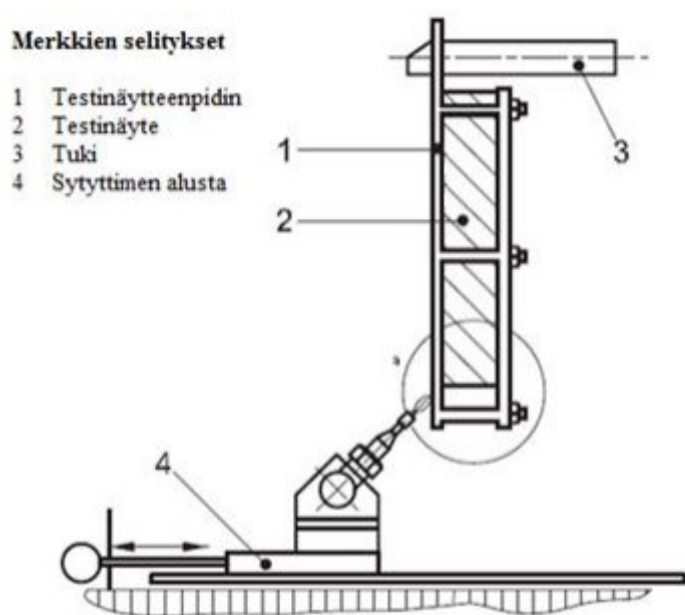


Kuva 4 Kartiokalorimettilaite. (VTT Oy)

### 5.3 Pienliekkikoe

EN ISO 11925-2 standardin mukaisessa polttotestissä mitataan tuotteen syttyvyyttä sekä liekin leviämistä pienen liekin suorasta kosketuksesta. Testissä 250 mm x 90 mm ja maksimissaan 60 mm paksu koekappale asetetaan pystysuoraan testinäytepidikkeeseen. Pidikkeessä oleva koekappale altistetaan 20 mm korkealle liekille, mikä on 45°:n kulmassa. Testin aikana tarkkaillaan myös kappaleesta irtoavia palavia ja putoilevia pisaroita. (SFS-EN ISO 11925-2:2010, s. 4-5.)

Standardin mukaisessa testissä on käytössä kaksi altistusaikaa ja testinkestoaikaa tavoiteltavan paloluokan mukaan. E-luokassa kappaletta altistetaan liekille 15 sekuntia ja testi päättyy 20 sekunnin päästä, kun liekki on poistettu. B, C ja D luokkien kappaleita altistetaan 30 sekunnin ajan liekille ja testi päättyy 60 sekunnin päästä liekin poistamisesta. Testi voidaan myös lopettaa aikaisemmin, mikäli syttymistä ei havaita liekin poistamisen jälkeen, liekinärkki ulottuu näytteen yläreunaan tai näyte lakkaa palamasta. Standardin mukaista testiä varten tarvitaan vähintään 6 koekappaletta. Kolmen koekappaleen tulee olla leikattuna tuotantosuunnassa ja kolmen sitä vastaan kohtisuorassa olevasta suunnasta. (SFS EN ISO 11925-2. s. 4-11.)



Kuva 5 Standardin mukainen testikokoonpano. (SFS-EN ISO 11925-2:2010, s.16.)

### 5.4 Termogravimetrinen analyysi (TGA)

Termogravimetrisessä analyysissä tutkitaan koekappaleen massan muutosta lämpötilan ja ajan funktiona. Koekappale altistetaan lämpötilan muutokselle konvektiolla tai säteilyttämällä. Koekappaleen massassa tapahtuvia muutoksia mitataan lämmitysvaiheessa, jäähdytysvaiheessa tai kappaleen vakio­lämpötilassa. Analyysi voidaan suorittaa typpi-, helium-, argon- tai ilma-atmosfäärissä tai tyhjiössä. (Gallagher, P. 1998, s.225-263.)

Analyysin tulokset ilmaistaan koekappaleen massan suhteena lämpötilaan tai aikaan. Termogravimetriä käytetään esimerkiksi orgaanisille aineille, joiden sulamispisteet ovat tarkasti määriteltävissä sekä sulaminen ja kiinteytyminen tapahtuvat nopeasti. Termogravimetriä analyysissä tutkittavaa materiaalia voidaan käsitellä sellaisessa muodossa kuin sitä käsiteltäisiin normaalisti. Koekappaleen massan muutokset johtuvat näytteen haihtumisesta, hajoamisesta tai kemiallisista muutoksista. Näytteen massan muutoksista voidaan määrittää milloin reaktio tapahtuu, miten kauan se kestää ja kuinka suuri osa näytteestä osallistuu reaktioon. (Gallagher, P. 1998, s.225-263.)

Termogravimetrian laitteisto koostuu yleensä upokkaasta, mikrova’asta ja uunista. Näyte asetetaan sulatusastiassa uunin sisällä olevaan upokkaaseen, mikä on kytketty mikrovaakaan. Testeissä käytetyt sulatusastiat ovat yleensä valmistettu keramiikasta, piidioksidista tai eri metalleista, jotta ne eivät reagoisi näytteestä vapautuvien kaasujen tai muiden aineiden kanssa. Termogravimetriassa käytettävät uunit lämpeävät 1100-1700 °C:een asti. Uunin keskelle muodostuu tasaisen lämpötilan alue minkä lämpötilaa ja lämpenemisnopeutta voidaan säädellä tarkasti. (Gallagher, P. 1998, s.237-244, s.261-263.)



## 6 Paloluokituksen määrittäminen laskennallisesti

### 6.1 Yksiulotteinen terminen liekinleviämismalli

Yksiulotteista termistä liekinleviämismallia hyödyntämällä voidaan laskea ennuste SBI-kokeen lämmöntuottokäyrästä. Aiempien tutkimusten mukaan SBI-kokeesta voidaan ennustaa melko tarkasti ensimmäinen huippu lämmöntuottokäyrästä kartiokalorimetrikokeen tuloksien pohjalta. Yleensä tämä ensimmäinen huippu on mitoittavana tekijänä FIGRA-indeksille. FIGRA-indeksi kuvastaa lämmöntuoton kasvunopeutta kertoen miten materiaali käyttäytyy palotilanteessa. Laskentaa varten tarvitaan kartiokalorimetrikokeen tuloksista saatava  $50 \text{ kW/m}^2$ :n säteilyaltistuksella saatu lämmöntuottokäyrä. (Hakkarainen, T. & Mikkola, E. 2005, s 5-6.)

Laskenta perustuu liekinleviämisen perusyhtälöön 6.1

$$\frac{dx_p(t)}{dt} = \frac{x_f(t) - x_p(t)}{t_{ig}} \quad (6.1)$$

missä  $x_p$  on pyrolyysirintaman sijainti  
 $x_f$  on liekin korkeus  
 $t_{ig}$  on karakteristinen syttymisaika

Liekinkorkeuskorrelaatiosta voidaan laskea liekin korkeus  $x_f$  kaavalla:

$$x_f(t) = k_f [\dot{Q}(t)]^n \quad (6.2)$$

missä  $\dot{Q}(t) = \dot{Q}_0(t) + \dot{Q}_{mat}(t)$  on polttimeen ja koekappaleen lämmöntuoton summa.  
 $k_f$  ja  $n$  ovat ominaisia vakioita.

Pyrolyysirintaman sijainti saadaan laskettua kaavalla:

$$x_p(t_{i+1}) = \left(1 - \frac{\Delta t_{i+1}}{t_{ig}}\right) x_p(t_i) + \left(\frac{\Delta t_{i+1}}{t_{ig}}\right) x_f(t_i) \quad (6.3)$$

Laskennassa tulee huomioida pyrolyysirintaman ja liekin korkeuden pitävyys ajanhetkille, jolloin liekki on heikkenemässä. Tämä otetaan huomioon kun  $x_f(t_{i+1}) < x_p(t_{i+1})$  niin käytetään  $x_p(t_{i+1}) = x_f(t_{i+1})$ . (Kokkala M. et al. 1997, s 315.)

Koekappaleen lämmöntuotto voidaan laskea kaavasta:

$$\dot{Q}_{mat} = x_{p0} w \dot{q}''(t) + w \int_{\tau=0}^{\tau=t} \dot{q}''(t - \tau) \frac{x_f(t) - x_p(t)}{t_{ig}} d\tau \quad (6.4)$$

missä  $x_{p0}$  on pyrolyysirintaman alkukorkeus  
 $w$  on pyrolyysialueen leveys  
 $\dot{q}''$  on kartikalorimetrikokeesta saatava lämmöntuottokäyrän arvo  
 $t_{ig}$  on kartiokalorimetrikokeesta saatava syttymisaika

Palokäsitellyille puutuotteille on optimoitu palokokeiden perusteella parametrit  $k_f$ ,  $w$ ,  $n$  ja  $x_{p0}$ . Tuula Hakkaraisen ja Matti Kokkalan aikaisempien tutkimuksien perusteella palosuojatuille puille optimoidut arvot ovat:

$$k_f=0.048$$

$$w=0.20\text{m}$$

$$n=0.77$$

$$x_{p0}=0.26\text{m}$$

(Hakkarainen, T. & Kokkala, M. 2005, s 63-64.)

Lisäksi kartiokalorimetrikokeesta saadut syttymisaika, aikajana sekä lämmöntuottokäyrä tulee skaalata vastaamaan SBI-kokeen rasitusolosuhteita.

Kaavalla 6.5 saadaan skaalattua syttymisaika vastaamaan  $30\text{kW/m}^2$  säteilyrasitusta:

$$t_{ig,30} = t_{ig,50} \frac{50 - \dot{q}_{cr}''}{50 - \dot{q}_{cr}''} \quad (6.5)$$

missä  $\dot{q}_{cr}''$  on materiaalin kriittinen säteilyvuon tiheys

Skaalattua syttymisaikaa,  $t_{i,30}$  käytetään liekin leviämisen sekä materiaalin lämmön tuoton laskemiseen.

Lämmöntuottokäyrä skaalataan vastaamaan  $25\text{ kW/m}^2$  arvoa. Skaalaus tehdään hyödyn-tämällä puun hiiltymisen analyttistä mallia:

$$\beta \propto 0.2 \dot{q}_{ext}'' + 5$$

missä  $\beta$  on hiiltymisnopeus  
 $\dot{q}_{ext}''$  on ulkoinen lämmöntuotto

Lämmöntuottokäyrä  $25\text{ kW/m}^2$  säteilyllä on noin 2/3 mitatusta arvosta  $50\text{ kW/m}^2$  teholla. Lisäksi olettaessa, että koko näyte-kappale palaa ajan myötä ja lämmön tuotto on vakio, voidaan testin kesto skaalata kertoimella 3/2.

Koska laskentamallissa oletetaan, että laskennan tuloksena saatu lämmöntuottokäyrä saavuttaa  $50\text{ kW/m}^2$  arvon, tarvitsee ei-skaalatun kartiokalorimetrikokeesta saadun käyrän saavuttaa arvo  $75\text{ kW/m}^2$ . Mikäli kartiokalorimetrikokeessa mitattu HRR on alle  $75\text{ kW/m}^2$  koko testin ajan, voidaan materiaalin arvioida saavuttavan B-luokka ilman laskentaa.

Laskentamallista saatuja arvoja voidaan käyttää SBI-kokeesta saatavien FIGRA-arvojen ennustamiseen. Kaavaa 6.6 käytetään FIGRA arvojen laskentaan.

$$FIGRA = 1000 \times \max \left( \frac{HRR_{av}(t)}{t - 300} \right) \quad (6.6)$$

missä  $HRR_{av}(t)$  on lämmöntuoton keskiarvo ajanhetkellä  $t$ .

### 6.1.1 Laskentapohjan validointi

Kappaleessa 6.1 esitetyn laskentamallin mukaisesti tehdyn laskentapohjan validointiin käytettiin Danish institute of fire and security technology:n (DBI) tekemien SBI- ja kartiokaloreimetrikokeiden tuloksia. (Pauner, A. M. 2007.)

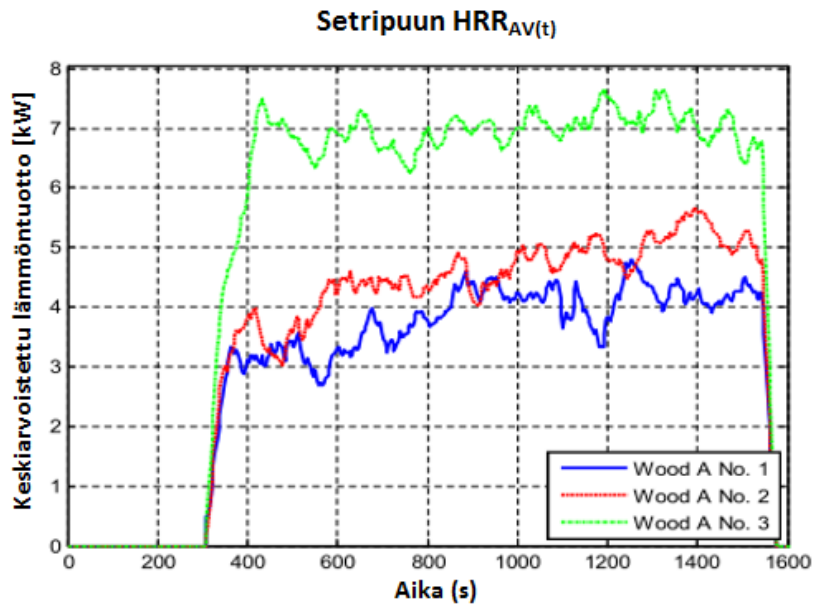
DBI:n laatimassa raportissa oli palotestattavana palosuoja-aineella käsiteltyjä koivu- ja setripuuprofiileja. Testattavien koivuprofiilien paksuus oli 21 mm ja setripuuprofiilien 17,8 mm. Molempien puulajien profiilit testattiin EN-standardien mukaisilla kartiokaloreimetrisellä SBI-kokeilla. Molemmille puulajeille tehtiin 5 kartiokaloreimetrikoe ja 3 SBI-koe.

Puutuotteilla esiintyy yleensä ainakin kaksi piikkiä SBI- ja kartiokaloreimetrikokeen lämmöntuottokäyrästössä. SBI-kokeessa jälkimmäisen piikin syntymisen syy on eri kuin kartiokaloreimetrikokeessa vaikkakin palamisprosessi on samanlainen. SBI-kokeen alku noudattaa samanlaisesti kartiokaloreimetrikoe eli kappale syttyy, lämpö nousee ja hiiltä alkaa muodostumaan hidastaen lämmöntuottoa. SBI-kokeessa jälkimmäinen piikki syntyy yleensä kun hiilikerros alkaa halkeilemaan, kappaleesta irtoaa osia sekä vahingoittumaton puu altistuu liekeille ja lämmölle. Lisäksi koekappale palaa edestä ja takaa samaan aikaan. (Hansen, A. 2002 s. 94.)

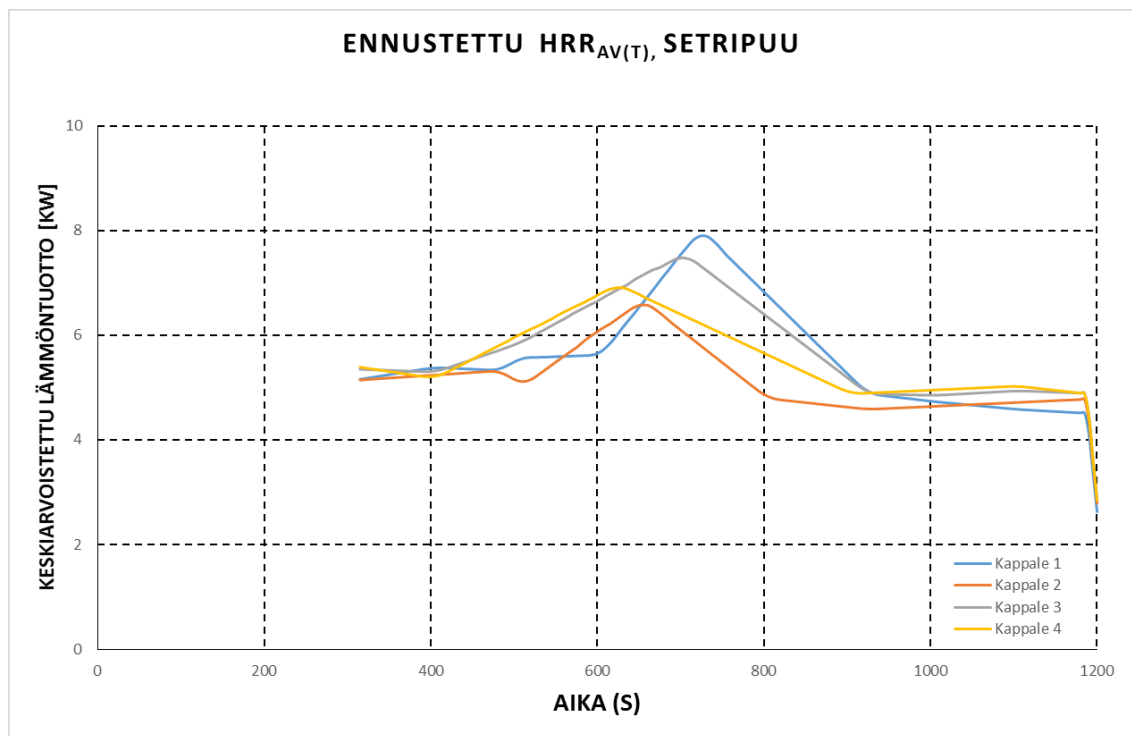
Kartiokaloreimetri- ja SBI-kokeella on kaksi selvää eroa, mitkä vaikuttavat merkittävästi laskentamallien ennusteisiin. Kartiokaloreimetrikokeessa säteilijän lämpöteho on vakio ja se vaikuttaa koekappaleen koko pintaan. SBI-testissä polttimeen liekki aiheuttaa erilaisia lämpötehoja koekappaleen eri kohtiin. Toinen ero on SBI-testin fysikaaliset ilmiöt kuten reumat, liitokset, taipumat ja sortumiset, joita ei taas voida replikoida kartiokaloreimetrikokeessa. (Hakkarainen, T. & Kokkala, M. 2001 s. 87.)

### 6.1.2 Laskentamallin ennusteet

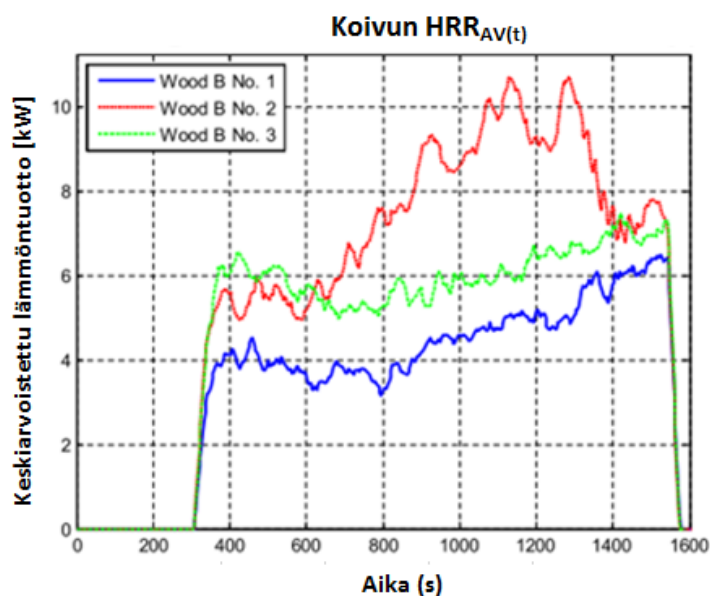
Kuvissa 6 ja 8 on esitelty laboratoriossa tehtyjen SBI-kokeiden  $HRR_{av(t)}$ -käyrät.  $HRR_{av(t)}$  on palon keskiarvoistettu lämmöntuotto ajanhetkellä  $t$ . Kuvissa 7 ja 9 on esitelty kartiokaloreimetrikokeiden tuloksista lasketut ennusteet SBI-kokeiden lämmöntuottokäyrästä. Kartiokaloreimetrikokeiden lämmönvapautumisnopeus-käyrät löytyvät liitteistä. Molempien puulajien kartiokaloreimetrikokeista jätettiin yhdet koekappaleet huomioimatta pitkien syttymisaikojen vuoksi.



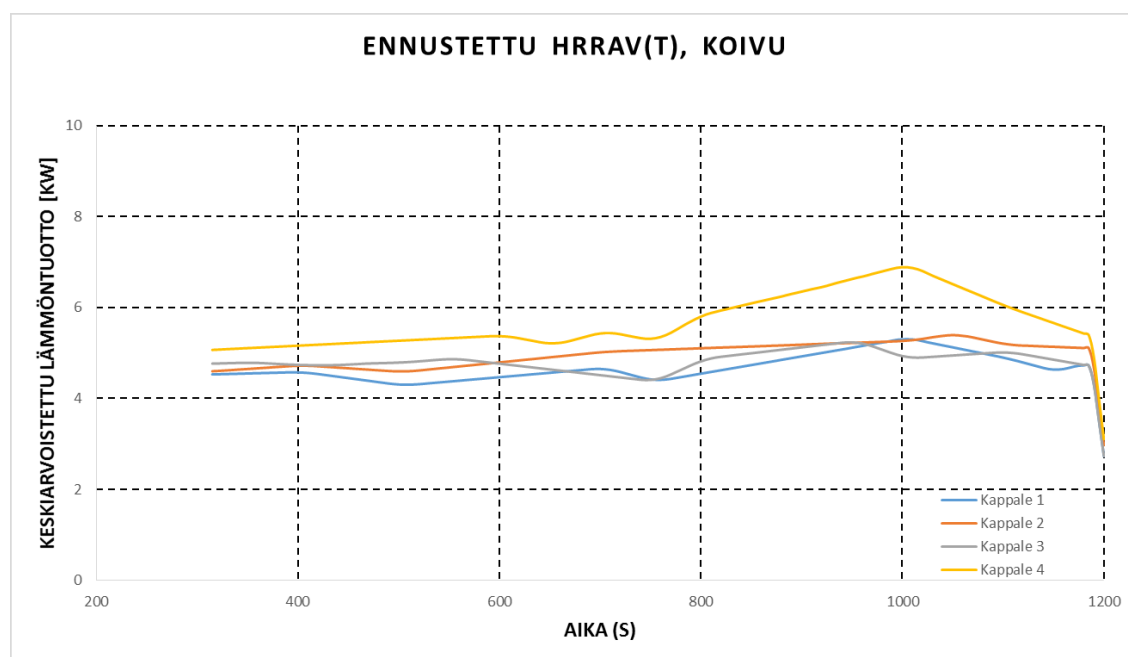
Kuva 6 Laboratoriossa tehtyjen SBI-kokeiden tulokset setripuulle. (Muokattu kuva, Pau-  
ner, A. M. 2007. s.14-16.)



Kuva 7 Setripuun keskiarvoistetun lämmöntuoton ennusteet.



Kuva 8 Laboratoriossa tehtyjen SBI-kokeiden tulokset koivulle. (Muokattu kuva, Pauner, A. M. 2007. s.14-16.)



Kuva 9 Koivun keskiarvoistetun lämmöntuoton ennusteet.

Kuvia vertaamalla nähdään, että ennusteet noudattavat melko tarkasti virallisten SBI-kokeiden tuloksia. Koivun syttymisestä syntyvä lämpöteho ennustuu keskimäärin 10 % pienemmäksi kuin oikeiden kokeiden tuloksissa. Setripuun ennusteissa syttymisestä aiheutuva lämpöteho on keskimäärin 13 % suurempi kuin oikeiden kokeiden. Koivun 400-800 sekunnin välillä ennusteet ovat 7 % oikeiden kokeiden tuloksia matalempia. Setripuun ennusteet taas ovat samalla aikavälillä 22 % korkeampia kuin oikeiden kokeiden tulokset. Aiempien tutkimusten mukaan SBI-kokeesta voidaankin ennustaa melko tarkasti ensimmäinen huippu lämmöntuottokäyrästä. Yleensä SBI-kokeen ensimmäiset vaiheet määrittävät FIGRA-indeksin raja-arvon paloluokan määrittämistä varten. (Hakkarainen et al. 2005, s. 36.)

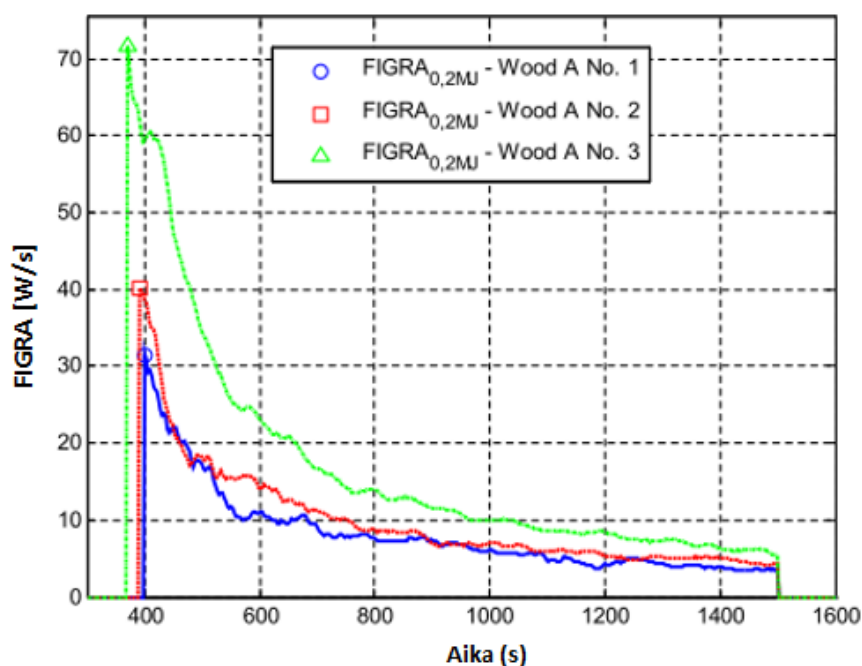
Taulukossa 8 on esitetty laboratoriossa tehtyjen SBI-kokeiden tulokset sekä kartiokalorimetrikokeiden tuloksista ennustetut arvot. Taulukosta nähdään, että molempien puulajien SBI-kokeiden sekä laskennallisesti ennustetut arvot täyttävät paloluokan B vaatimukset eli  $FIGRA_{0,2MJ}$  on pienempi kuin 120 W/s ja  $THR_{600s}$  on alle 7,5 MJ.

Taulukko 8 SBI-kokeiden ja ennusteiden  $FIGRA_{0,2MJ}$  sekä  $THR_{600s}$  arvot.

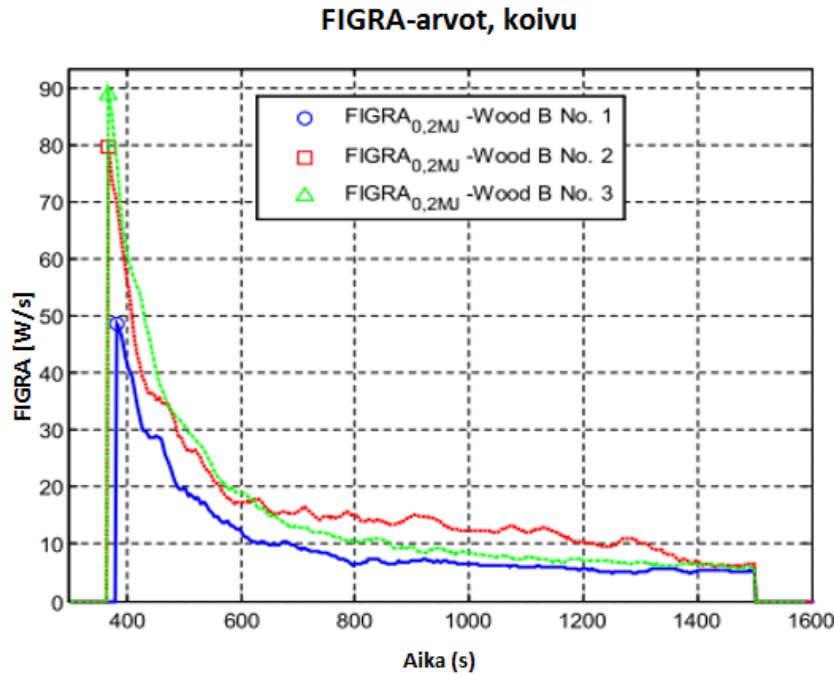
Setripuu							
	SBI 1	SBI 2	SBI 3	Ennuste 1	Ennuste 2	Ennuste 3	Ennuste 4
$FIGRA_{0,2MJ}$	32	40	72	104.9	103.6	106.6	123.8
$THR_{600s}$	2.0	2.3	3.8	2.6	2.3	2.6	2.5
Koivu							
	SBI 1	SBI 2	SBI 3	Ennuste 1	Ennuste 2	Ennuste 3	Ennuste 4
$FIGRA_{0,2MJ}$	49.0	80.0	89.0	75.9	77.7	95.6	92.0
$THR_{600s}$	2.2	3.5	3.2	1.9	2.1	2.0	2.3

Kuvissa 10 ja 11 on toteutettujen SBI-kokeiden FIGRA-käyrät. Kuvissa 12 ja 13 on kartiokalorimetrikokeiden tuloksien perusteella lasketut ennusteet FIGRA-käyristä. Lisäksi kuviin 12 ja 13 on piirretty tehtyjen SBI-kokeiden tuloksien keskiarvojen kuvaaja.

### FIGRA-arvot, setripuu

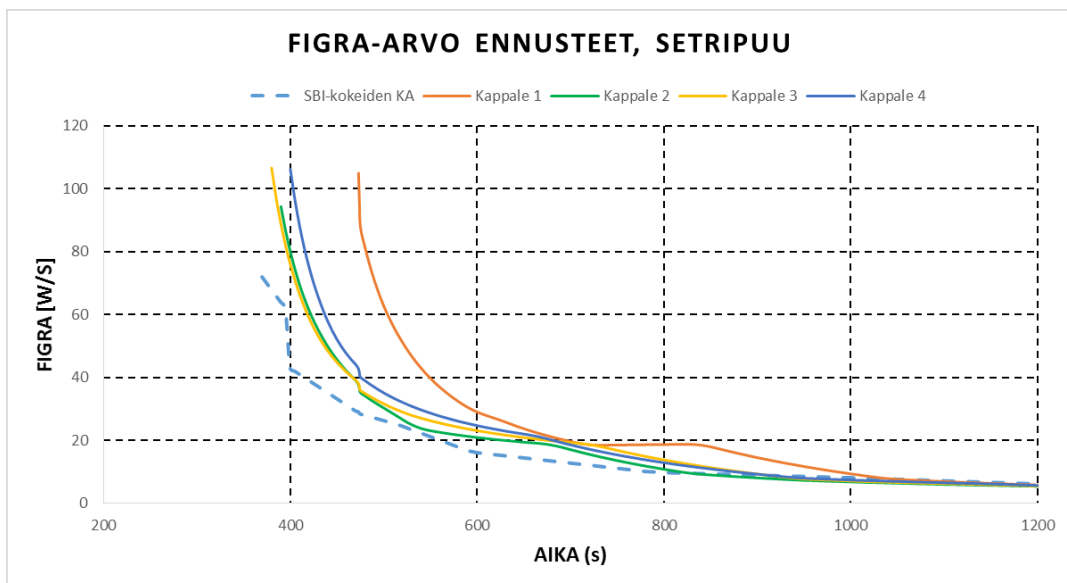


Kuva 10. FIGRA-käyrät laboratoriossa testatuille setripuulle. (Muokattu kuvasta, Pauner, A. M. 2007. s.17.)



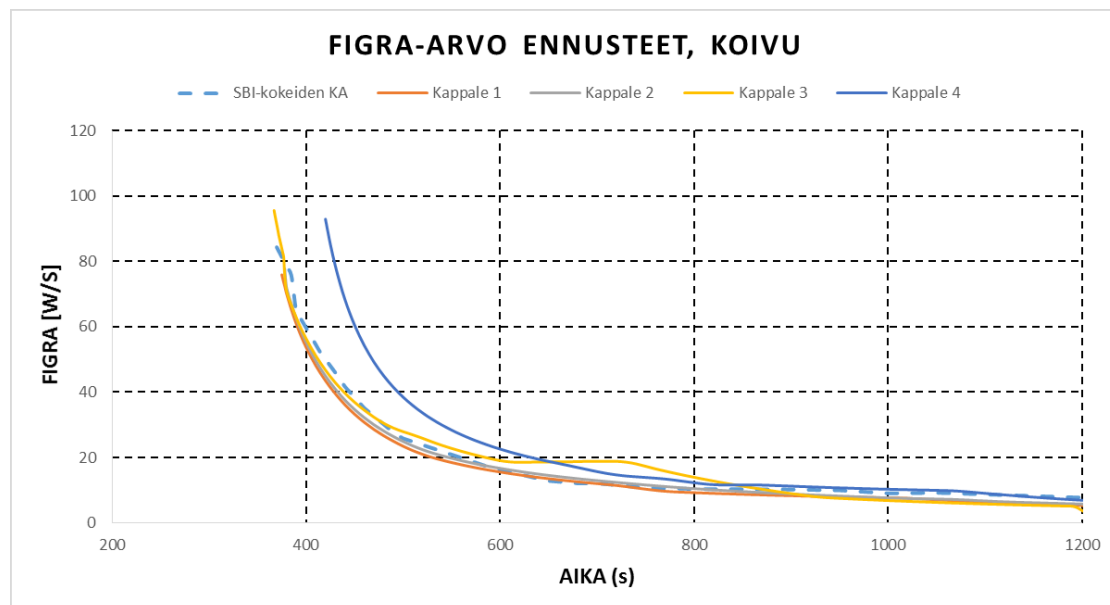
Kuva 11.  $FIGRA_{0,2mJ}$ -käyrät laboratoriossa testatuille koivuille. (Muokattu kuva, Pauner, A. M. 2007. s.15.)

Ennusteiden syttymisajoille tehtiin aikasiirto kartiokalomietrikokeiden syttymisaikojen perusteella. Kuvasta 12 ja 13 nähdään, että kartiokalomietrikokeiden syttymisaikat eivät vaikuta juuri ollenkaan FIGRA-arvoihin. Setripuun koekappaleella 1 ja koivun koekappaleella 4 oli lähes kaksinkertainen syttymisaika kuin muilla sarjojen koekappaleilla. Syttymisaika vaikuttaa pääosin siirtämällä ajallisesti eteenpäin laskennassa syntyviä FIGRA-arvoja. Puiden paloluokitusten kannalta sillä ei ole suurta merkitystä, sillä vaikuttavat FIGRA-arvot määritellään aikaväliltä 300-1500 sekuntia, jolloin pitempikään syttymisaika ei skaalaa FIGRA-arvoja määrittelyn ulkopuolelle.



Kuva 12. Ennustetut  $FIGRA_{0,2mJ}$ -käyrät setripuuprofiileille.

Kuvasta 12 nähdään, että setripuulle kokeen alkuvaiheessa ennustetut  $FIGRA_{0,2MJ}$ -arvot ovat merkittävästi suurempia kuin SBI-kokeen vastaavat arvot. Keski- ja loppuvaiheen arvot noudattavat hyvin oikeiden kokeiden arvoja. Setripuun koekappaleiden ennusteina saadut arvot täyttävät paloluokka B:n vaatimukset, sillä  $FIGRA_{0,2MJ}$  on alle 120 W/s ja  $THR_{600s}$  on pienempi kuin 7,5 MJ.



Kuva 13 Ennustetut FIGRA-käyrät koivuprofiileille.

Kuvasta 13 nähdään, että koivun kartiokalomietrikokeiden pohjalta tehty ennusteet noudattavat hyvin jokaisessa vaiheessa tehtyjen SBI-kokeiden FIGRA-arvoja. Keskiarvallisesti ennustetut FIGRA-arvot vastaavat hyvin SBI-kokeissa saatuja FIGRA-arvoja.

Laskentapohja ennusti koivun FIGRA-arvot pienemmiksi kuin setripuun. Tämä johtuu siitä, että koivun kartiokalomietrikokeen alkupään lämmönvapautumisnopeudet olivat keskimäärin pienempiä kuin setripuun vastaavat arvot. Setripuun  $FIGRA_{0,2MJ}$ -arvojen ennusteet olivat keskimäärin 56 % korkeampia kuin oikeiden kokeiden FIGRA-arvot. Koivun ennusteet olivat keskimäärin 15 % korkeampia oikeisiin kokeisiin verrattuna. Syy suuriin vaihteluihin tuloksissa, erityisesti setripuun kohdalla, johtuu kartiokalomietrikokeiden tuloksien suurista eroavaisuuksista. Eroavaisuudet saattavat johtua puun epähomogeenisuudesta sekä palosuoja-aineiden käsittelyjen onnistumisen vaihtelevuudesta. Setripuun ennustetut  $THR_{600s}$ -arvot olivat keskimäärin 7 % oikeiden kokeiden arvoja pienempiä. Myös koivun ennustetut  $THR_{600s}$ -arvot olivat keskimäärin 30 % pienempiä kuin oikeiden kokeiden. Laskentapohja ennustaa tarkasti kokonaislämmöntuoton ( $THR_{600}$ ), syttymisen ajankohdan sekä myös kohtuullisesti FIGRA-arvot.



## 7 Tammen kartiokaloremetrikoheet

### 7.1 Koekappaleet

Tutkimukseen puulajiksi on valikoitunut tammi, sillä sen menekki sisäverhouksissa on suuri. Tammi on kohtuullisen suorasyinen puu ja sen fyysiset ominaisuudet ovat erinomaiset. Lisäksi pinta kestää hyvin kulutusta sekä erilaisia käsittelymenetelmiä.

Diplomityötä varten teetettiin 30 kappaletta 95x95x21 kokoisia ympärihöylättyjä tammi-kappaleita. Jokaista ryhmää varten käsiteltiin 6 kappaletta palikoita. Työtä varten koekappaleet käsiteltiin kahdella yleisesti käytettävällä palosuoja-aineilla. Tässä työssä palosuoja-aineita kutsutaan palosuoja-aine A:ksi ja B:ksi. Diplomityön tutkimuksen kannalta aineiden nimeäminen ei ole olennaista, koska työn tavoitteena ei ole vertailla yksittäisten palosuoja-aineiden toimivuuden eroja. Taulukossa 9 on esitelty koekappaleiden käsittelyt ja tunnuksot.

*Taulukko 9 Koekappaleiden käsittelyt sekä sarjojen tunnuksot.*

Käsittely	Tunnus
Käsitlemätön	Ref
Palosuoja-aine A	B
Palosuoja-aine A + lakka	C
Palosuoja-aine B	D
Palosuoja-aine B + Lakka	E

Palosuoja-aine A on kombinaatio turpoavasta ja pyrolyysia muuttuvasta aineista. Palosuoja-aine pyrkii sisältämällään kemikaaleilla rajoittamaan palavien pyrolyysi-aineiden syntymistä sekä vähentämään puun lämpöhajoamista. Lisäksi lämpötilan noustaessa pinnoite alkaa paisua muodostaen huokoisen hiilikerroksen, millä on matala lämmönjohtavuus. Paisunut pinta suojaa kappaletta hidastamalla kappaleen sisällä tapahtuvaa lämpötilan nousua. Lisäksi kerros estää hapen pääsyn pinnalle ja rajoittaa pyrolyysia kiihdyttävien kaasujen poispääsyä kappaleesta. Palosuoja-aine B:n toiminta perustuu pääosin maalipinnan turpoamiseen kuumetessaan.

Koekappaleiden jokainen sivu käsiteltiin palosuoja-aineella. Lisäksi C- ja E-ryhmän kappaleiden sivut käsiteltiin vesiohenteisella vesilakalla, jotta nähtäisiin sen mahdollinen vaikutus paloon.



Kuva 14 Sarja koekappaleita.

Palosuoja-aineiden ja lakkojen levitys toteutettiin maalauslinjastolla. Palosuoja-aineiden ja lakan levitysmäärissä noudatettiin aineiden valmistajien ohjeita. Koekappaleet punnittiin ennen ja jälkeen käsittelyjen, jotta saatiin selville toteutuneet levitysmäärät. Punnituksien tuloksien mukaan palosuoja-aineiden ja lakkojen levitysmäärät olivat jokaisella kappaleella suurempia kuin ohjearvot.

## 7.2 Koejärjestelyt

Diplomityön laskentaosuutta varten koekappaleet poltettiin kartiokalometrillä VTT Oy:n laboratoriossa Espoossa. Ennen kartiokalometrilämpiä koekappaleet piti vakioda tasapainokosteuteen. EN 13238 standardin mukaan palosuoja-aineella käsiteltyjen puukappaleiden tulee olla vähintään 8 viikkoa ilmastoidussa tilassa, missä lämpötila oli  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  ja suhteellinen kosteus RH 50 % (EN 13238, s. 6-7). Kartiokalometrilämpiä käytetyt koekappaleet olivat 65 päivää vakioitumassa VTT:n tiloissa. Lisäksi noudatettiin ISO 5660-01 standardin mukaista ohjeistusta, että koekappaleita tulee ilmastoida kunnes massan muutos 24 tunnin aikana on korkeintaan 0,1 % koekappaleen massasta tai 0,1 grammaa. (ISO 5660-01, s.10-11.)

Koepäivät alkoivat aina kartiokalometrin laitteiden kalibroinnilla. Lämpövuoksi asetettiin jokaiseen polttokokeeseen  $50 \text{ kW/m}^2$ . Koekappaleiden pohja sekä päätysivut eristettiin foliolla ja asetettiin 2,5 mm paksuiseen teräsastiaan. Kuvassa 15 näkyy valmisteltu koekappale sekä aiemmin poltetu kappale. Näytteiden lukumäärän ja testien pituuksien vuoksi koekappaleet poltettiin kahtena erillisenä päivänä.

Kartiokalometrilaitteen ohjelmisto seurasi ja tallensi excel-taulukkoon mm. massahäviön, lämmönvapautumisnopeuden sekä kokonaislämpömäärän. Koekappaleet olivat 1300-1400 sekuntia lämpövuolle altistuneena. Testit päätettiin aina kun lämmönvapautuminen oli selkeästi heikentynyt tai kokonaan loppunut.



Kuva 15 Poltettu ja poltettava koekappale.

### 7.3 Tulokset

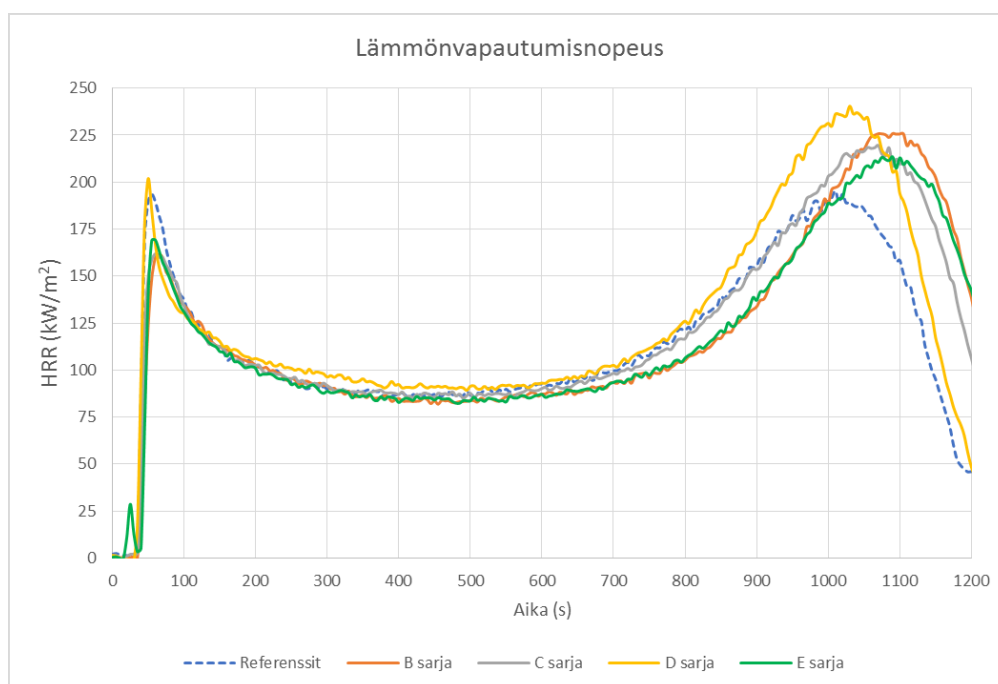
Kartiokalorimetrikokeiden tulokset olivat melko erilaisia verrattuna aikaisempiin tutkimustuloksiin. Aikaisempien tutkimusten perusteella (Hakkarainen et al. 2005, Dietenberger, M. et al. 2012, Grexa, O., & Lübke H 2001, Wang et. al. 2014.) palosuoja-aineet alentavat merkittävästi kappaleen lämmönvapautusnopeutta ja sitä kautta massahäviötä. Lisäksi kappaleissa tapahtunut kokonaislämmöntuotto on pienempää. Myös puun palamiselle hyvin tyypillinen 2. piikki lämmönvapautumisnopeudessa jää usein syntymättä tai se on hyvin pieni arvoltaan.

Tuloksina saadut lämmönvapautumisnopeuden käyrät (kuva 14) noudattavat puulle tyypillistä kuviota. Ensimmäinen piikki syntyy, kun kappaleista vapautuu haihtuvia aineita, jotka syttyvät palamaan. Leimahdus ylläpitää puun pyrolyysiä vapauttaen samalla lisää haihtuvia kaasuja. Ensimmäinen lasku käyrissä tapahtuu kun kappaleen pintaan alkaa muodostua eristävää hiilikerrosta, joka vaikeuttaa lämmön siirtymistä sekä hidastaa pyrolyysissä tarvittavien kaasujen vapautumista. Kappale saavuttaa hyvin vakaan tilan missä se palaa vähitellen ennen seuraavaa piikkiä (Marney et. al. 2008, s.326). Seuraava piikki käyrästössä tapahtuu kun kappale on läpipalanut ja lämmönsiirtyminen estyy lämpörintaman kohdalla koekappaleen pohjalla olevan eristekerroksen. Lopullinen lasku lämmönvapautumisnopeudessa tapahtuu kun kappaleesta loppuu aineiden vapautuminen, liekehtiminen loppuu ja kappale jää hehkumaan. (Spearpoint & Quintiere, s. 309.)

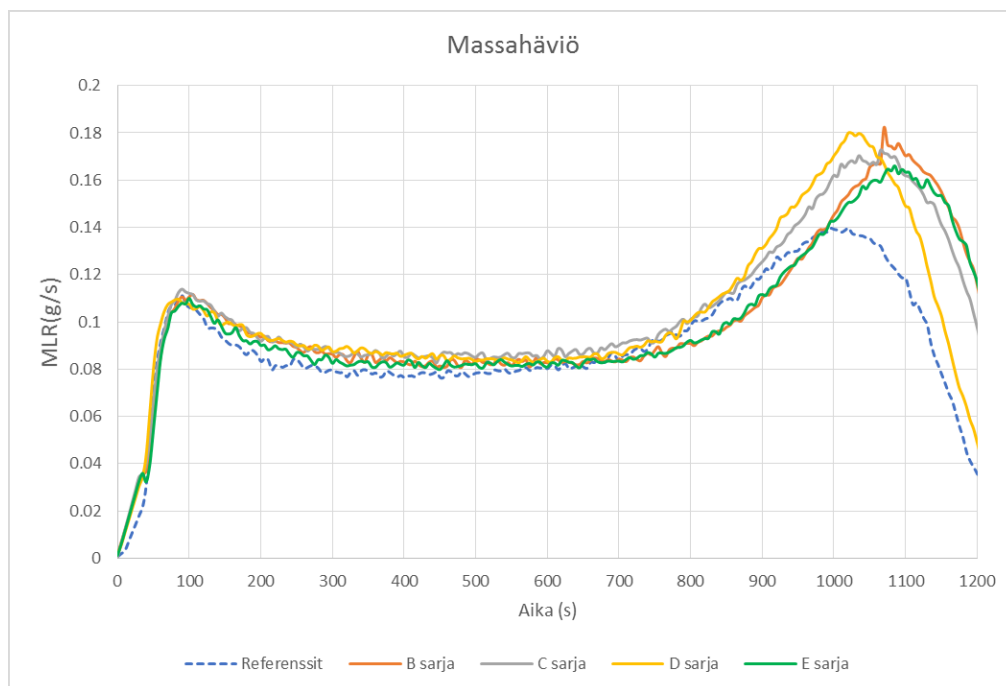
Taulukko 10 Kartiokalorimetrikokeiden tuloksia.

	Ref 1	Ref 2	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3
Huippuarvo, HRR (kW/m <sup>2</sup> )	201.69	191.92	238.80	225.39	232.31	222.41	219.88	228.63	236.97	244.03	243.81	225.33	208.08	236.32
Huippuarvo, EHC (MJ/kg)	75.89	57.50	69.71	68.95	48.01	40.72	71.44	64.48	57.40	40.85	63.54	71.41	40.36	79.44
Huippuarvo, MLR (g/s)	0.15	0.15	0.19	0.19	0.18	0.18	0.19	0.19	0.18	0.20	0.18	0.18	0.17	0.19
Keskisarvo, HRR (kW/m <sup>2</sup> )	111.41	105.50	116.99	112.33	113.52	115.62	111.01	113.31	119.97	118.37	118.61	119.23	107.67	114.76
Keskisarvo, EHC (MJ/kg)	11.21	11.41	10.50	10.68	10.48	10.27	10.63	10.44	10.98	10.96	11.08	10.79	10.20	10.61
Keskisarvo, MLR (g/s)	0.09	0.08	0.10	0.09	0.10	0.10	0.09	0.10	0.10	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10
Kokonaislämmöntuotto (MJ/m <sup>2</sup> )	142.61	144.01	151.51	154.46	152.18	149.17	158.77	156.94	155.38	153.89	155.38	156.22	144.33	156.64
Massahäviö (%)	78.17	78.00	75.57	76.67	76.98	75.22	76.83	76.00	78.30	77.60	78.06	75.78	74.88	76.33
Syttymisaika, T <sub>ig</sub> (s)	33	30	34	33	33	41	36	34	31	29	34	17	16	20

Taulukosta 10 sekä kuvasta 15 nähdään, että tehtyjen kokeiden perusteella palosuoja-aineilla oli myös heikentäviä vaikutuksia tuloksiin. Käsitellyillä koekappaleilla oli suuremmat kokonaislämmöntuotto-arvot sekä liekinleviämisenopeuden huippuarvot kuin käsittelemättömillä kappaleilla. Lämmönvapautumisnopeus kertoo kuinka voimakkaasti kappale palaa tietyllä ajanhetkellä ja miten se muuttuu palon aikana. Kokonaislämmöntuotto kuvaa materiaalin kemiallisiin sidokseen sitoutuneen energian vapautumista kappaleesta palon aikana. Tehollinen lämpöarvo (EHC), joka kertoo yleisesti liekin palamisprosessista sekä kappaleen sisällä olevien aineiden muutoksista, oli myös hieman pienempi käsitellyillä kappaleilla. (Grexa & Lübke s.429). Lisäksi palosuoja-aineet eivät pidentäneet merkittävästi syttymiseen kulunutta aikaa. Syttymiseen kuluva aika kuvaa kuinka kauan materiaali kestää ulkoista lämpöenergiaa ennen kuin se syttyy. Sarja E jopa syttyi huomattavasti nopeammin kuin referenssikappaleet. Sarjojen sisäisten rinnakkaiskokeiden toistettavuus oli kuitenkin hyvä tulosten perusteella.



Kuva 15 Kartiokalorimetrikokeiden keskiarvot lämmönvapautumisnopeudet.

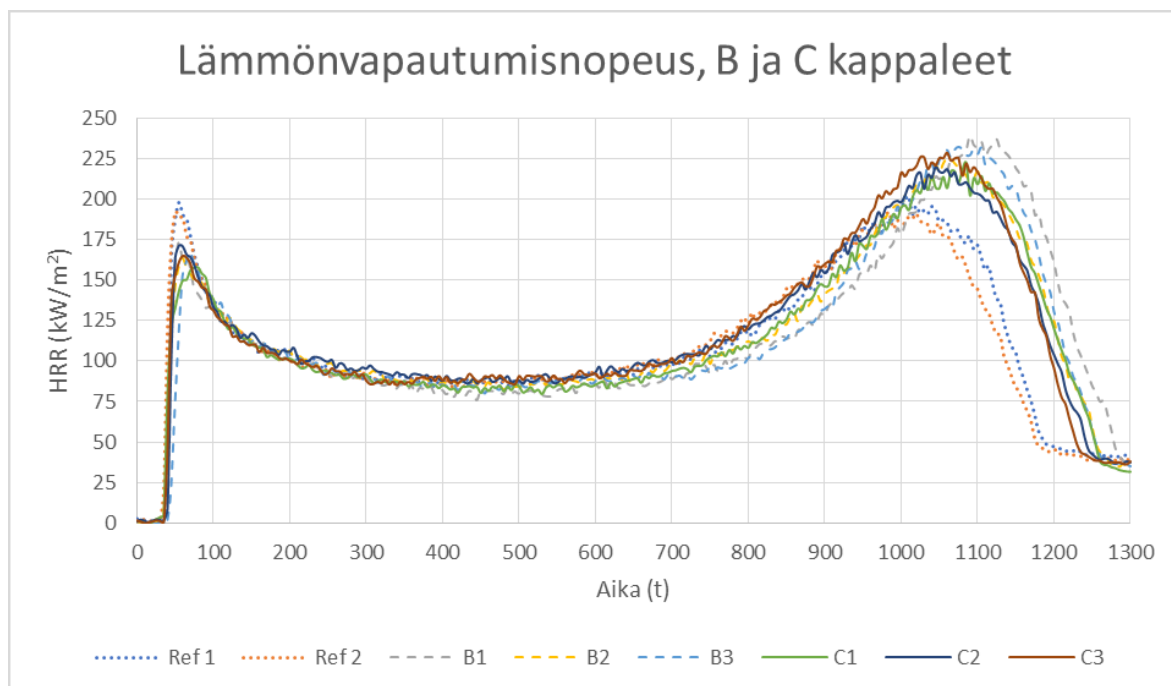


Kuva 16 Testikappaleiden keskiarvolliset massahäviöt ajan funktiona.

Massahäviö ilmaisee, kuinka testattu materiaali pyrolysoituu eli miten nopeasti liekinle-  
viämistä tapahtuu kappaleessa. Massahäviöt noudattavat yleensä lämmönvapautumisno-  
peuden käyriä. Kuvia 15 ja 16 vertaamalla voidaan todeta, että kuviot ovat hyvin saman-  
kaltaiset. Lisäksi suhteellinen massahäviö oli hieman pienempi kuin referenssikappaleilla.  
Massahäviön kasvut ja laskut johtuvat samoista syistä kuin lämmönvapautumisnopeuden  
muutokset.

### 7.3.1 B- ja C-sarjat

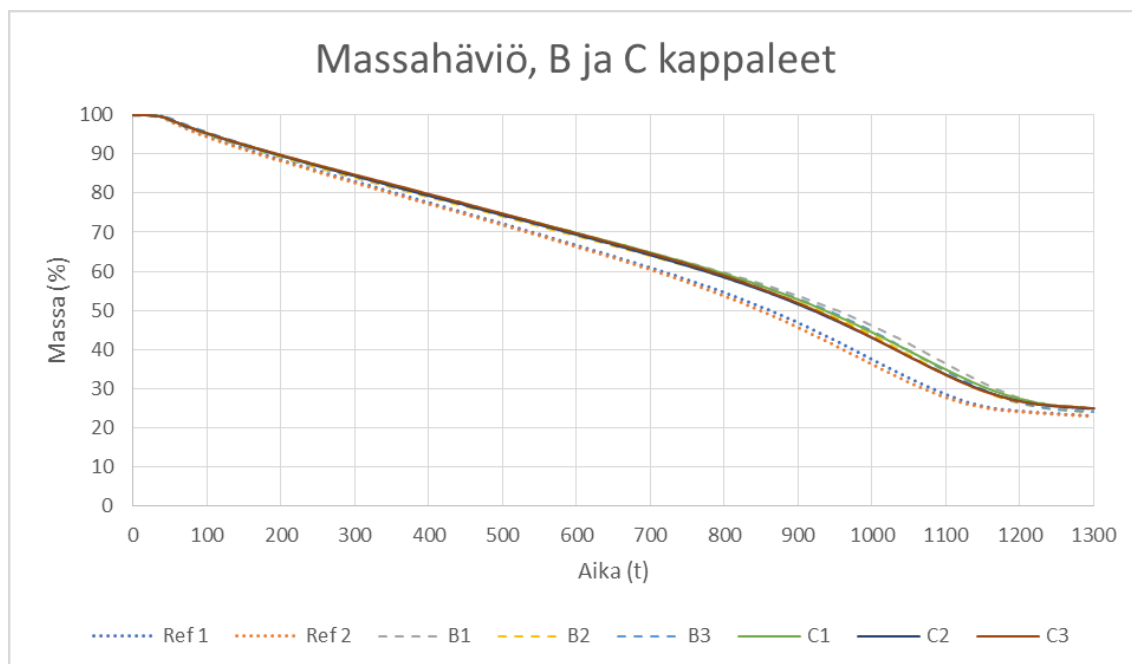
B- ja C-sarjan koekappaleet käsiteltiin palosuoja-aine A:lla. Lisäksi C-sarjan koekappalei-  
den pinnat käsiteltiin lakalla. Taulukosta 10 nähdään, että B- ja C-sarjan kappaleiden syt-  
tymisajat olivat hieman pitempiä kuin referenssikappaleiden. Tämä on tyypillistä palosuo-  
ja-aineille, jotka vaikuttavat pyrolyysireaktioihin, koska ne alentavat kappaleen lämmön-  
vapauttamista hidastaen samalla koekappaleen syttymistä.



Kuva 17 B- ja C-sarjan koekappaleiden lämmönvapautumisnopeudet.

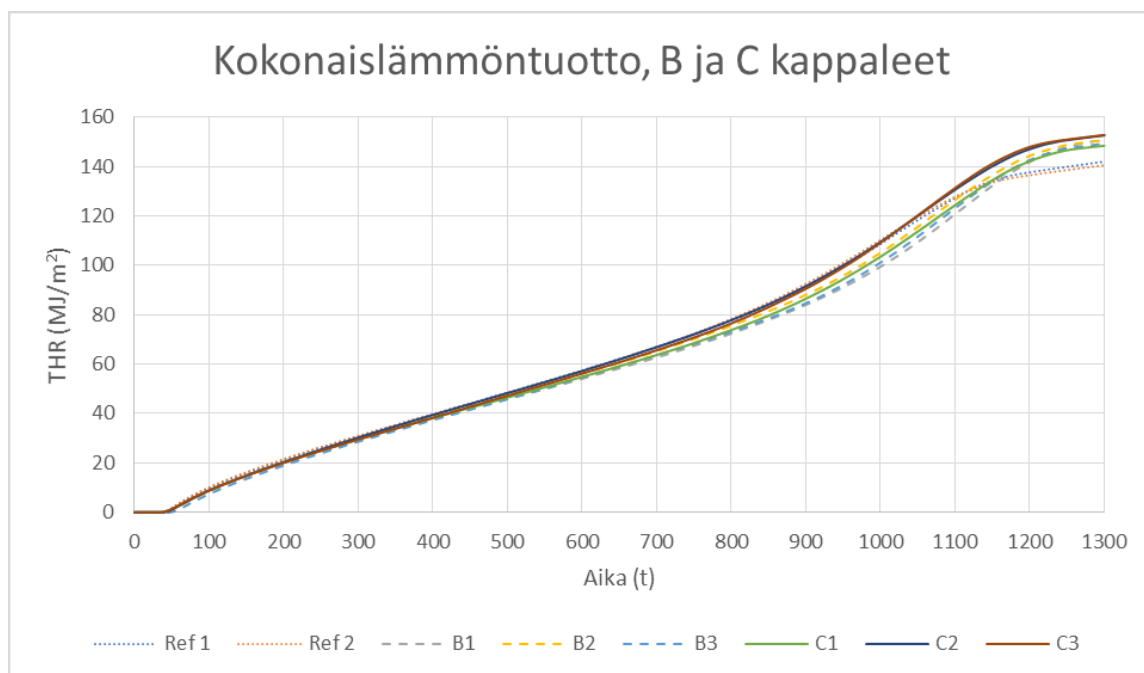
Palonestoaineen lisääminen ei vaikuttanut koekappaleiden lämmönvapautumisnopeuteen tai palo aikaan niin paljon kuin muiden aikaisempien tutkimusten perusteella voisi olettaa. Kuvasta 17 nähdään, että ensimmäisessä piikissä käsiteltyjen kappaleiden lämmönvapautumisnopeus on keskimäärin 20 % pienempää kuin referenssikappaleilla. Tämä johtuu palosuoja-aineiden kemikaaleista, jotka reagoidessaan lämpöön alkavat paisua ja muodostamaan puuta suojaavaa eristekerrosta, mikä estää lämmön siirtymistä puuhun. Kun hiili- tai palosuoja-aineesta syntyvä turpoava kerros on muodostunut, lämmönvapautumisnopeus laskee ja tasaantuu. C-sarjan koekappaleiden sisältämällä lakalla ei ole merkittävää vaikutusta lämmönvapautumisnopeuteen.

Aikaisempien tutkimuksien mukaan palosuoja-aineet pidentävät selvästi kappaleiden palo-aikaa (Wang et. al. s. 4937). Tuloksien perusteella kuitenkin 100-800 sekunnin kohdalla tapahtuva palamisvaihe on lähestulkoon identtistä kaikilla kappaleilla, jonka vuoksi palo-aikakin on lähestulkoon sama. Referenssikappaleet alkavat kytämään aikaisemmin kun taas käsitelty kappaleet palavat kiivaammin ja pitempään. Mahdollinen syy käsiteltyjen kappaleiden korkeampiin arvoihin toisessa piikissä 1000-1100 sekunnin kohdalla voi johtua palosuoja-aine A:n sisältämisestä rautaoksidi-aineista, jotka voivat oksidoitua vapauttaen samalla paljon lämpöä.



Kuva 18 B- ja C-sarjan koekappaleiden massahäviö ajan funktiona.

Alle 100 sekunnissa kappaleilla on hyvin matala massahäviö, mikä johtuu kosteuden vapautumisesta ja inerttisten kaasujen pyrolysoitumisesta. 100 sekunnin kohdalla muodostuu hiilikerrosta, mikä hidastaa massahäviötä. Lisäksi kuvasta 18 nähdään, että kaikki kappaleet ovat n. 200-700 sekunnin välillä tasaisessa tilassa, missä massahäviö pysyy muuttumattomana. Lisäksi voidaan todeta palosuoja-aineen hidastavan massahäviötä. Toisen piikin kohdalla eli 1000-1100 sekunnin välillä tapahtuu suurin massahäviö. 1200 sekunnin kohdalla massahäviö pysähtyy, koska suurin osa koekappaleen massasta on hävinnyt.



Kuva 19 B- ja C-sarjan koekappaleiden kokonaislämmöntuotto.

Kuvasta 19 nähdään, että kokonaislämmöntuotto kasvaa hyvin tasaisesti toiseen lämmönvapautumisnopeuden piikkiin saakka, jonka jälkeen kasvu heikkenee. Tämä on tyypillistä poltettaessa puuta. Kuvasta on nähtävissä myös, että käsittelyillä ei ole ollut suurta vaikutusta kappaleen kokonaislämmöntuottoon. Tutkimusten mukaan palosuojaetuista kappaleista vapautuu selkeästi vähemmän energiaa palon aikana. Palosuoja-aineiden alkaessa reagoimaan lämpöön, pitäisi lämmöntuoton nousun loiventua. (Wang et. al. s. 4938.)

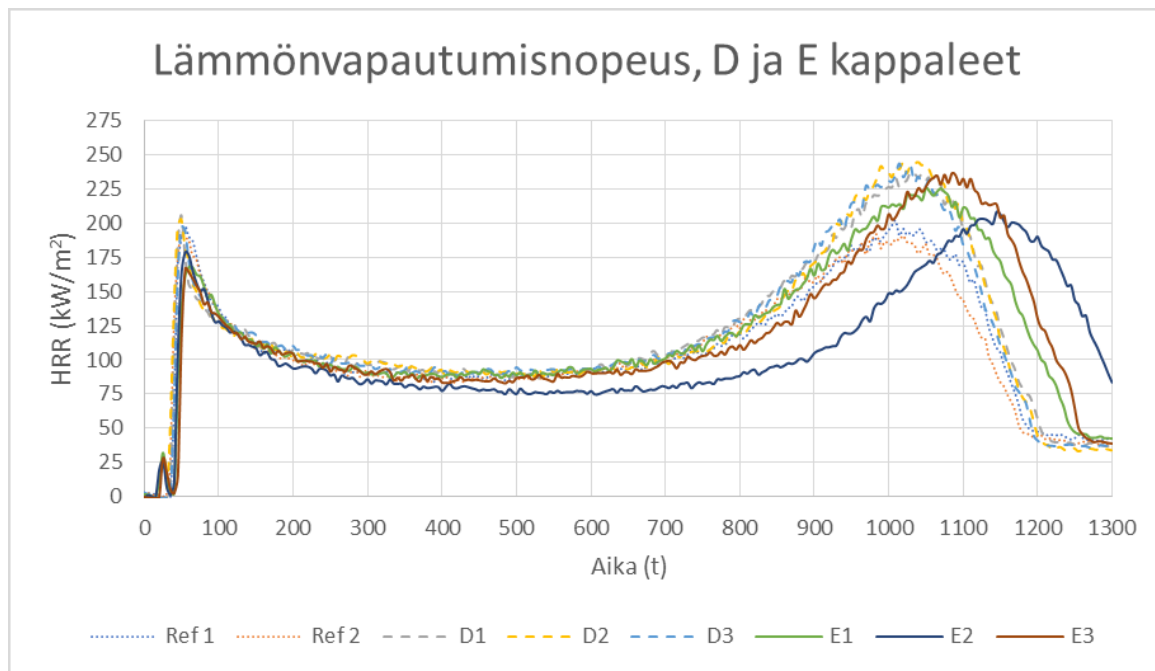


Kuva 20 Koepoltettu B-sarjan kappale



### 7.3.2 D- ja E-sarjat

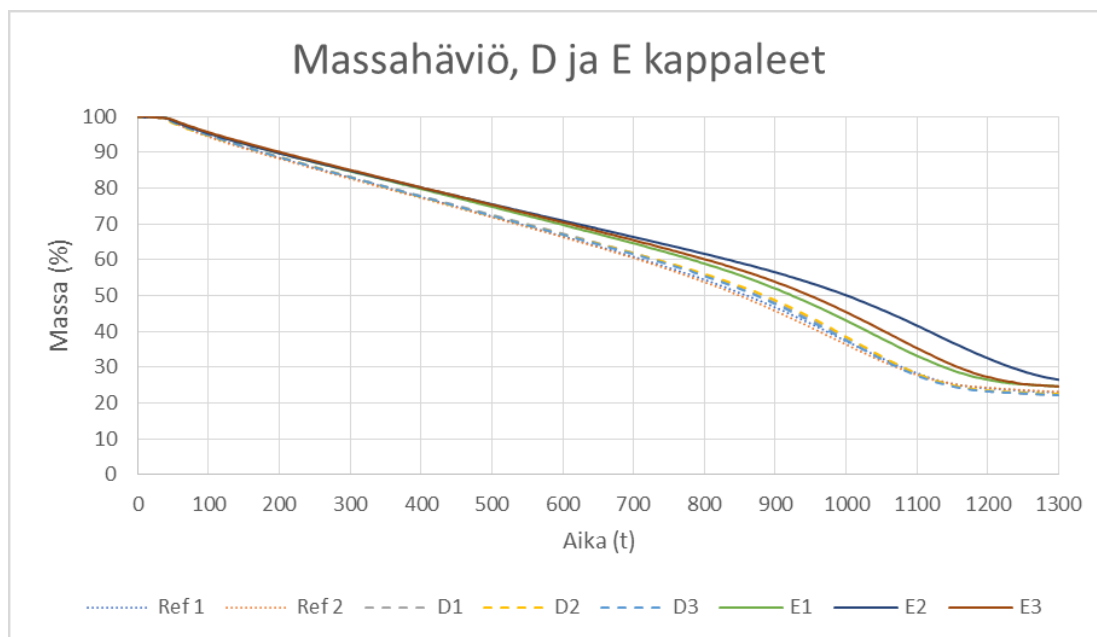
D- ja E-sarjan koekappaleet käsiteltiin eri palosuoja-aineella kuin B ja C-sarjan kappaleet. Lisäksi E-sarjan koekappaleet käsiteltiin lakalla. Taulukosta 10 nähdään, että D-sarjan koekappaleiden syttymisaika oli luokaltaan samaa kuin referenssikappaleiden. E-sarjan kappaleet syttyivät huomattavasti aikaisemmin kuin referenssikappaleet.



Kuva 21 D- ja E-sarjan koekappaleiden lämmönvapautumisnopeus.

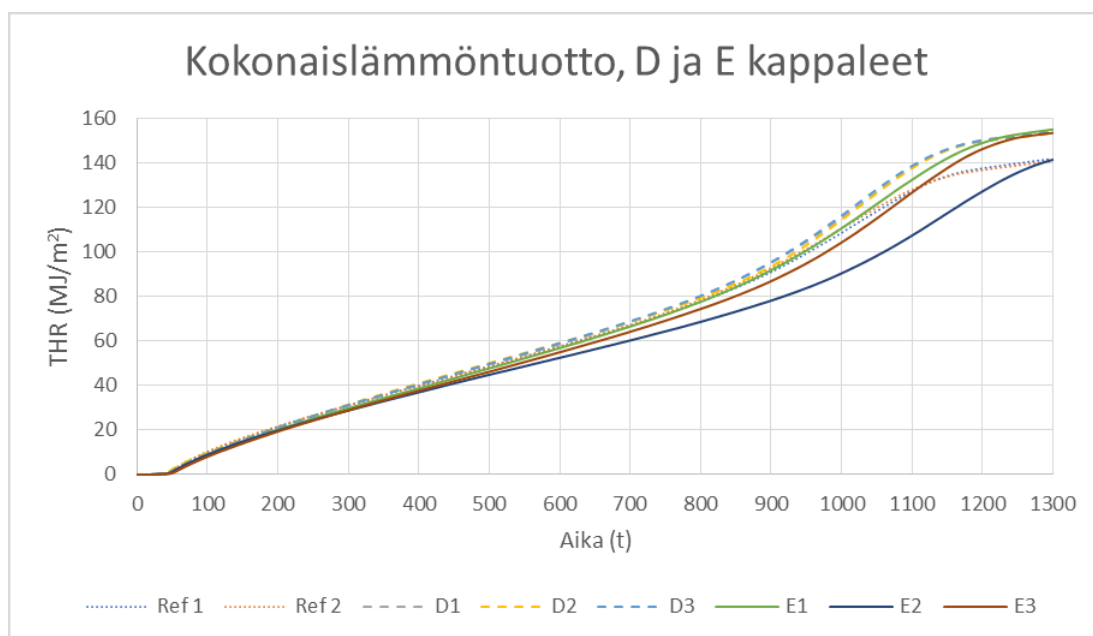
Lämmönvapautusnopeuksissa oli samankaltaista käyttäytymistä nähtävillä kuin B- ja C-sarjoissa. Sarjoissa D ja E käytetty palosuoja-aine ei myöskään tuottanut aikaisempien tutkimusten kaltaisia, matalia lämpötuottoja. Erityisesti D-sarjan koekappaleiden käyttäytyminen on erikoista, sillä palosuoja-aineella ei ole käytännössä ollenkaan vaikutusta. Lakatuilla koekappaleilla, erityisesti E2-koekappaleella lämmöntuotto oli huomattavasti matalampi kuin muilla käsitellyillä kappaleilla.

Kuvasta 21 nähdään, että ensimmäisessä piikissä D-sarjan kappaleilla on lähes sama lämmönvapautumisnopeus kuin referenssikappaleilla. E-sarjan kappaleilla on keskimäärin 20 % pienempi lämmönvapautumisnopeus kuin referenssikappaleilla. Suuria eroja nähdään 100-800 sekunnin kohdalla tapahtuvassa tasaisessa palamisvaiheessa kun E2-koekappale tuottaa huomattavasti matalamman lämmönvapautumisnopeuden kuin muut koekappaleet. Muiden koekappaleiden arvot ovat lähestulkoon samoja 900 sekuntiin asti. Myös D- ja E-sarjojen koekappaleiden tuloksissa on havaittavissa samoja piirteitä kuin B- ja C kappaleilla eli ne tuottavat merkittävästi enemmän lämpöä toisen piikin kohdalla.



Kuva 22 D- ja E-sarjan koekappaleiden massahäviö.

D- ja E-sarjojen kappaleiden massahäviö oli hyvin samanlaista kuin B- ja C-sarjoilla. Alle 100 sekunnissa kappaleilla on hidas massahäviö. 100 sekunnin kohdalla muodostuu massahäviötä hidastava hiilikerros. Kuvasta nähdään miten matala lämmönvapautumisnopeus vaikuttaa massahäviöön. E2-kappaleen huomattavasti matalampi lämmönvapautumisnopeus näkyy käyrästössä selvästi. 1100 sekunnin kohdalla E2-kappaleella on vielä 10 % enemmän massaa jäljellä kuin referenssikappaleilla. Myös D- ja E-sarjoilla tapahtuu toisen piikin kohdalla eli 1000-1100 sekunnin välillä kiivain massahäviö.



Kuva 23 E- ja D-sarjan koekappaleiden kokonaislämmöntuotto.

Kuvasta 23 nähdään, että kokonaislämmöntuotto on hyvin samanlaista kuin B- ja C-kappaleilla. E- ja D-sarjojen käsittelyillä ei ole myöskään merkittävää vaikutusta kokonaislämmöntuottoon. E2-kappaleen eroavaisuus muista koekappaleista näkyy myös kokonais-

lämmöntuotossa. 700-1100 sekunnin aikana E2-kappaleella on keskimäärin 25 % pienempi lämmöntuotto kuin referenssikappaleilla.



Kuva 24 Koepoltettu D-sarjan kappale.

## 8 Tammen paloluokitus laskennallisesti

Laskentapohjassa käytettiin InnoFireWood-projektissa suositeltua skaalausta lämpövuolle, sillä palosuoja-aineet käyttäytyvät hyvin erilaisesti kartiokalometri- ja SBI-kokeissa. Kartiokalometrin  $50\text{kW/m}^2$  lämpövuoto aiheuttaa tehokkaammin ja aikaisemmin lämpöhajomista kappaleessa kuin SBI-kokeessa käytettävän  $30\text{kW}$  sytytysteho. Lisäksi kappaleessa 6.1 esiteltyjä, aikaisemmissa tutkimuksissa hyväksi todettuja parametrien arvoja, käytettiin laskentapohjassa. Kaikille laskentapohjan tuloksena saaduille ennusteille tehtiin aikasiirto, jotta ne vastaisivat SBI-kokeiden tuloksia. Kappaleessa 6.1.1 todettiin, että kartiokalorimetrikokeiden koekappaleiden syttymisajoilla ei ole suurta merkitystä ennusteisiin. Tämä sama ilmiö näkyy selvästi myös tammen ennusteista.

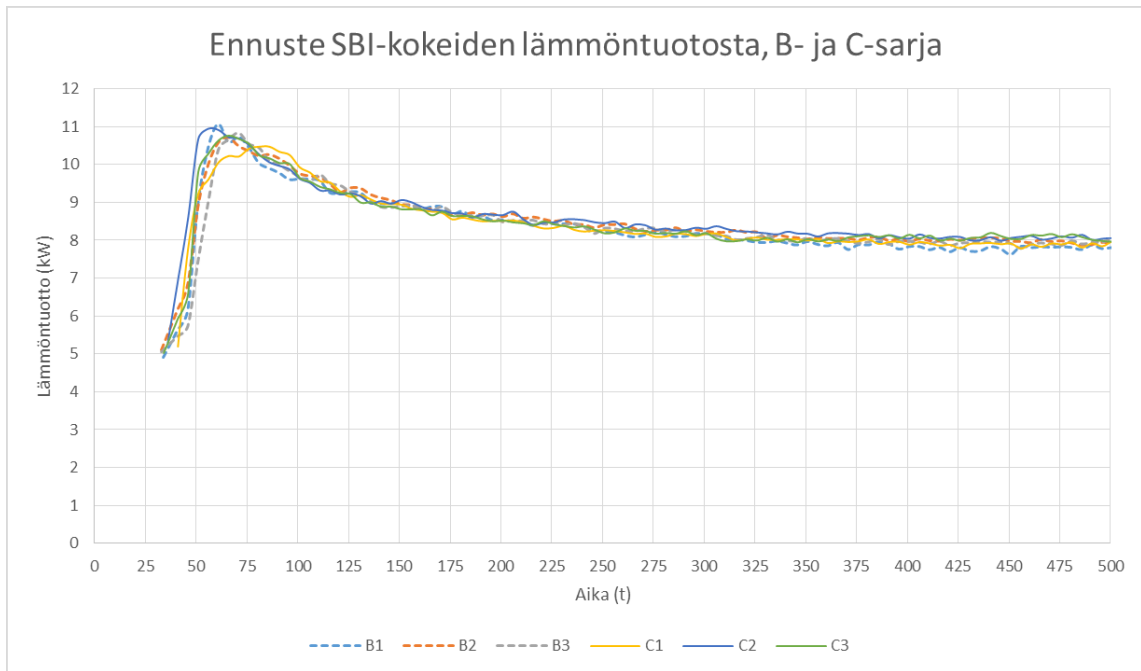
Ennusteina saatujen SBI-kokeiden lämmöntuotto-arvot noudattavat hyvin kartiokalorimetrikokeiden lämmönvapautumisnopeuden tuloksia. Molemmat piikit näkyvät ajallisesti samoissa kohdissa. Tuloksien perusteella voi todeta, että suuret lämmönvapautumisnopeudet lyhyessä ajassa aiheuttavat suuria FIGRA-arvoja. Kaikilla koekappaleilla oli korkea lämmönvapautumisnopeus kartiokalorimetrikokeiden alussa, joka vaikuttaa selvästi FIGRA-arvoihin. Kaikkien koekappaleiden ennuste  $\text{FIGRA}_{0,2\text{MJ}}$ -arvosta ylitti paloluokka B:n vaatiman raja-arvon  $120\text{ W/s}$ . Jokaisen koekappaleen ennustettu kokonaislämmöntuotto  $\text{THR}_{600\text{s}}$  olisi kuitenkin riittänyt B-luokkaan. Laskentapohjan ennusteiden mukaan kaikki koekappaleet saavuttaisivat paloluokan C eli  $\text{FIGRA}_{0,4\text{MJ}}$  arvo on kaikilla alle  $250\text{ W/s}$ . Tuloksien kuvaajat ovat rajattu lyhyelle aikavälille, jotta koekappaleiden erot näkyisivät selvemmin. Liitteestä 1 löytyy kokonaiset kuvaajat ennusteista.

### 8.1 B- ja C-sarjojen SBI-kokeiden ennusteet

Taulukosta 11 nähdään, että tuloksien osalta sarjojen välillä ei ole suurta eroa mikäli ei huomioida kappale C2 tulosta. B-sarjan koekappaleilla on keskimääräisesti pienempi kokonaislämmöntuotto, mikä johtuu siitä, että kappaleet muodostavat pienemmän lämpötehon. Myös kartiokalorimetrikokeissa B-sarjan koekappaleilla oli pienempi kokonaislämmöntuotto kuin C-sarjan koekappaleilla.

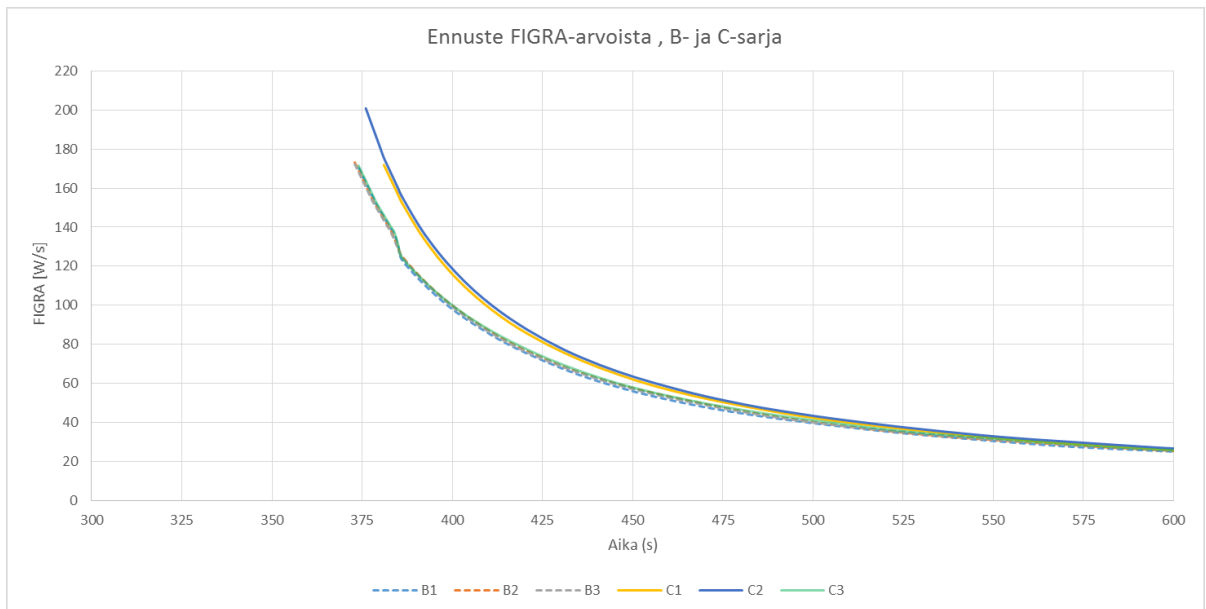
*Taulukko 11 B- ja C-sarjojen ennusteet.*

<b>B- ja C-sarja</b>						
	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
<b><math>\text{FIGRA}_{0,2\text{MJ}}</math> (W/s)</b>	170,13	173,13	172,24	171,89	200,87	171,50
<b><math>\text{FIGRA}_{0,4\text{MJ}}</math> (W/s)</b>	84,41	86,06	85,45	85,31	87,29	86,70
<b><math>\text{THR}_{600\text{s}}</math> (MJ)</b>	2,96	3,03	2,98	3,01	3,10	3,09

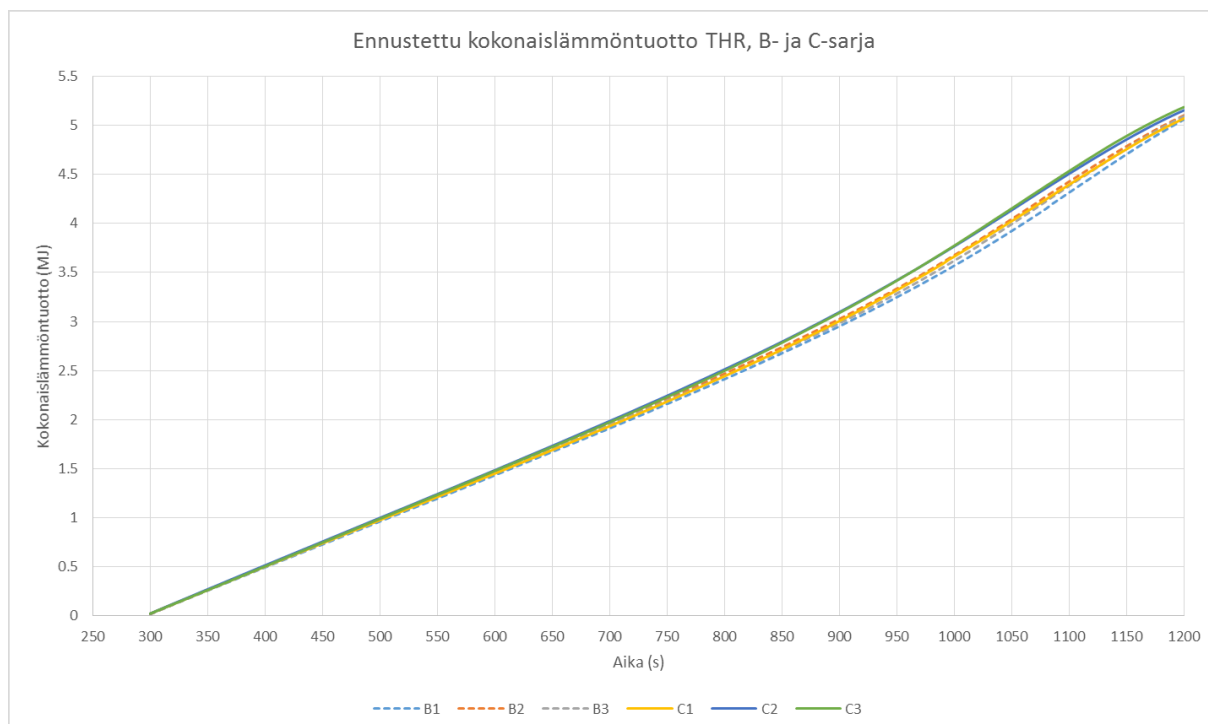


Kuva 25 B- ja C-sarjojen lämmöntuottojen ennusteet.

Vertaamalla kuvia 25 ja 26 pystytään näkemään lämmöntuoton ja FIGRA:n yhteys. Kappaleella C2 on 20 sekunnin ajan korkein lämmöntuotto, kun taas B-sarjan kappaleilla huiput esiintyvät ajallisesti lyhyinä. Tämä näkyy ennusteessa kappaleen C2 korkeana  $FIGRA_{0,2MJ}$ -arvona. 100 sekunnin jälkeen lämmöntuotto vakiintuu jokaisella koekappaleella aiheuttaen todella pieniä eroavaisuuksia arvojen välillä. Tämä näkyy FIGRA-käyrissä niiden ollessa lähes identtisiä 500 sekunnin jälkeen. Kuvasta 26 nähdään myös, että syttymisaika ei vaikuta näkyvästi FIGRA-arvoihin.



Kuva 26 B- ja C-sarjojen FIGRA-arvojen ennusteet.



Kuva 27 B- ja C-sarjojen kokonaislämmöntuoton ennusteet.

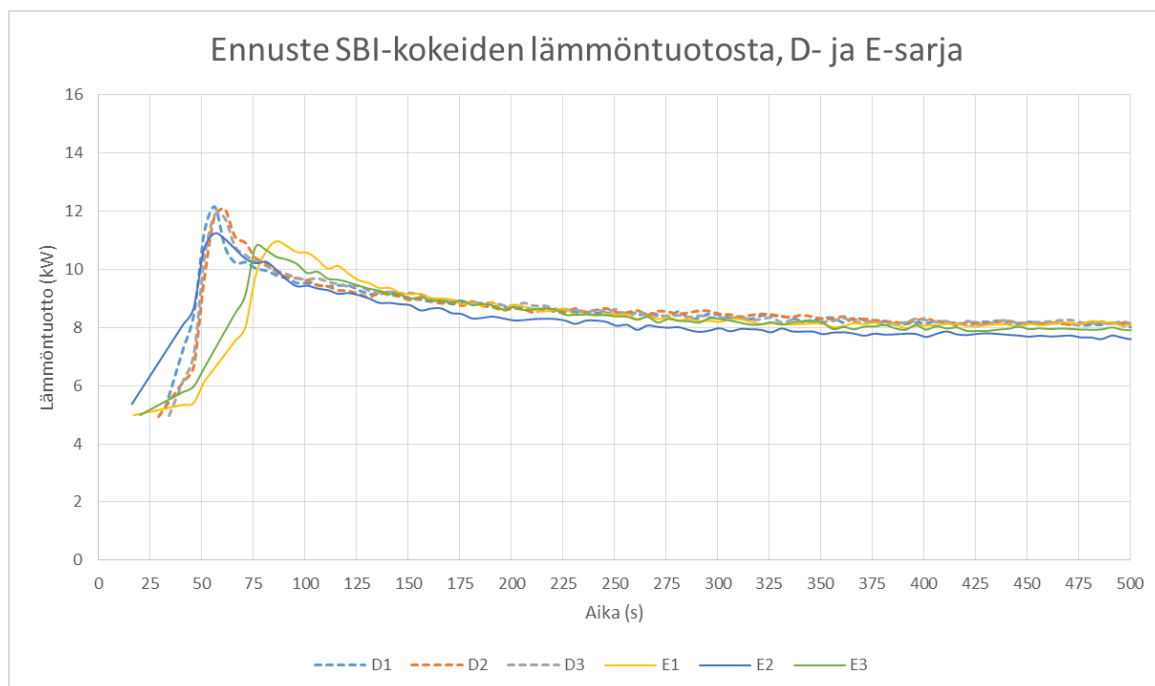
Koekappaleen C2 merkittävästi eroavaa tulosta selittää myös kokonaislämmöntuotto. C2-kappaleella on korkein kokonaislämmöntuotto koko testin ajan, mikä vaikuttaa siihen, että koekappale saavuttaa  $FIGRA_{0,2MJ}$ -arvon määrittämiseksi tarvittavan THR(t) raja-arvon muita koekappaleita aikaisemmin. Koekappaleiden ennustetut kokonaislämmöntuotot ovat linjassa kartiokalorimetrikokeiden tuloksiin, sillä molemmissa C-sarja tuottaa enemmän lämpöä.

## 8.2 D- ja E-Sarjojen SBI-kokeiden ennusteet

D- ja E-sarjojen osalta tulokset erosivat sarjojen kesken merkittävästi. Taulukosta 11 nähdään, että E-sarjan koekappaleiden ennusteet ovat keskimäärin 15 % pienempiä kuin D-sarjan. Sarjojen ennusteiden sisäinen hajonta on pientä. Koekappaleen E2 tuottamat, pienimmät  $THR_{600s}$  ja  $FIGRA_{0,2MJ}$ -arvot oli odotettavissa kun vertaa kartiokalorimetrikokeiden tuloksia keskenään.

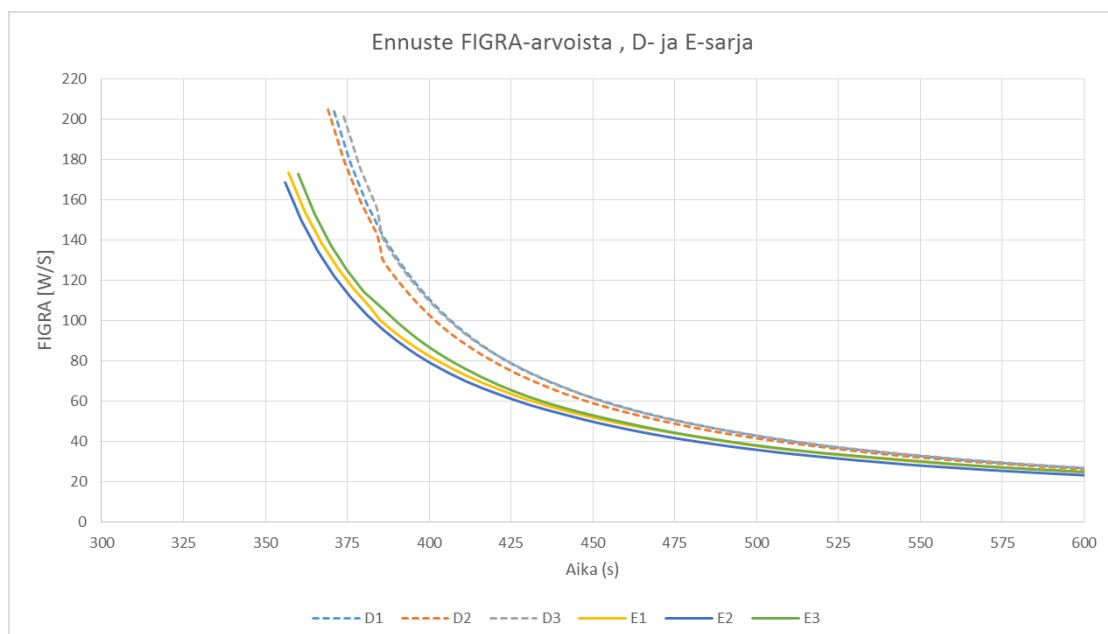
Taulukko 11 D- ja E-sarjojen ennusteet.

D- ja E-sarja						
	D1	D2	D3	E1	E2	E3
$FIGRA_{0,2MJ}$ (W/s)	203,97	204,73	201,39	173,59	168,75	172,96
$FIGRA_{0,4MJ}$ (W/s)	93,78	93,95	87,58	86,49	83,28	85,70
$THR_{600s}$ (MJ)	3,15	3,11	3,15	3,11	2,85	3,03

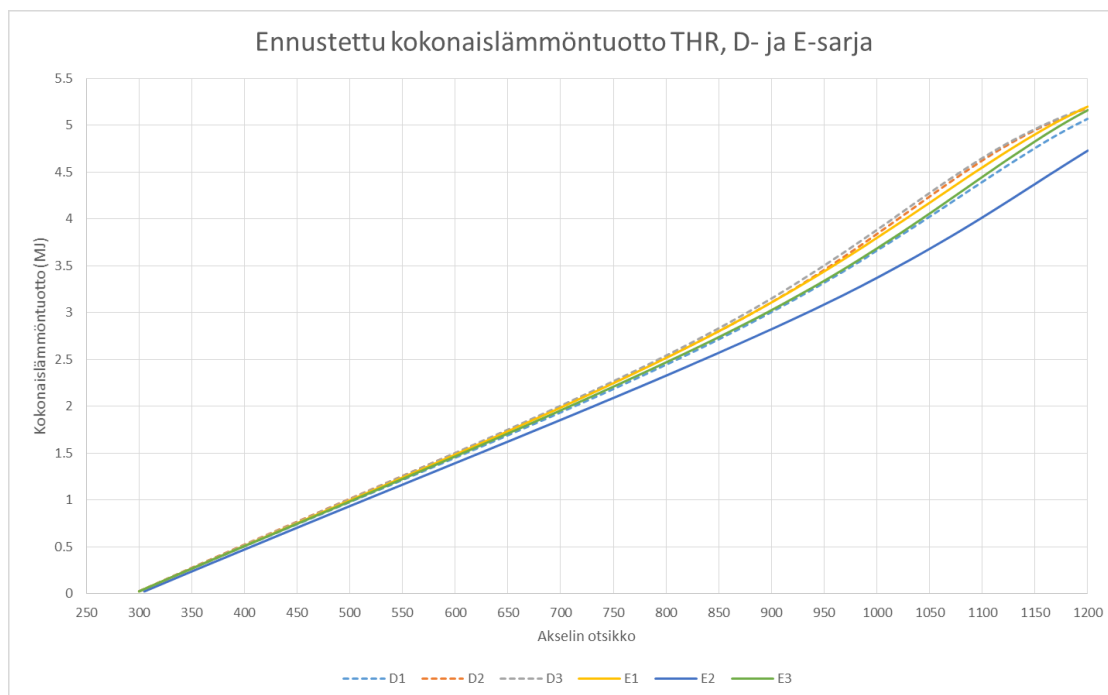


Kuva 28 B- ja C-sarjojen lämmöntuottojen ennusteet.

Kuvasta 28 huomataan, että E-sarjan kappaleiden alkuvaiheen nousut lämmöntuotossa olivat loivia. Tämä selittää E-sarjan matalia  $FIGRA_{0,2MJ}$ -arvoja. Koekappale E2 saavuttaa matalimman  $FIGRA_{0,2MJ}$ -arvon, koska sen tuottama lämpöteho on matalaa. 80 sekunnin kohdalla lämpöteho pienenee tasaisesti muiden koekappaleiden arvoja pienemmäksi. D-sarjan kartiokalorimetrikokeiden tulosten pieni hajonta näkyy myös selkeästi kuvasta, kun kaikki sarjan käyrät ovat lähes identtisiä.



Kuva 29 D- ja E-sarjojen FIGRA-arvojen ennusteet.



Kuva 30 D- ja E-sarjojen kokonaislämmöntuoton ennusteet.

Kokonaislämmöntuoton ennusteissa E2 kappale eroaa selkeästi muista. Sama ero on nähtävissä myös kartiokalorimetrikokeiden tuloksissa. Tämä johtuu E2 matalasta lämmöntuotosta.

### 8.3 Yhteenveto

Yleisesti tulokset olivat yhdenmukaisia eli sarjakohtaisesti tuloksien hajonta oli pieni. Sarjojen sisäinen ero FIGRA-arvoissa oli alle 5 % paitsi C-sarjassa. Tulosten yhdenmukaisuutta selittää kartiokalorimetrikokeiden lämmönvapautumisnopeuksien välinen pieni hajonta sarjojen sisällä.

FIGRA-arvojen kannalta merkittävin aikaväli tammirimojen ennusteissa on 300-400 sekunnin välillä. Alle 300 sekunnin tai yli 400 sekunnin lämmöntuottoarvot eivät vaikuta merkittävästi FIGRA-arvoihin. Kaikilla koekappaleilla ennusteet täyttivät vaadittavat THR(t) ja HRRav(t) raja-arvot 340-350 sekunnin kohdalla.

B-sarjan koekappaleiden  $FIGRA_{0,2MJ}$ -arvot olivat keskimääräisesti 37 % suurempia kuin paloluokkaan B vaadittava 120 W/s raja-arvo. Vastaavasti koekappaleilla oli C-sarjassa 45 %, D-sarjassa 63 % ja E-sarjassa 37 % suuremmat FIGRA-arvot 120 W/s raja-arvoon verrattuna.

Tulosten luotettavuutta arvioidessa on huomioitava, että tammirimoille ei tehty SBI-koetta, joten ennusteita ei päästy vertaamaan oikeiden kokeiden tuloksiin. Laskentapohjan validoinnin tuloksien perusteella laskentamalli ennusti keskimäärin FIGRA-arvot 36 % oikeiden SBI-kokeiden tuloksia korkeammiksi. Tämän perusteella mahdollisesti B- ja E-sarjan koekappaleet olisivat voineet täyttää paloluokkaan B vaadittavat raja-arvot.



## 9 Palokokeiden simulointi

### 9.1 *Fire dynamics simulator*

Fire dynamics simulator eli FDS on ilmainen palosimulaatioihin erikoistunut virtauslaskentaohjelma. FDS on teknologian tutkimuskeskuksen (VTT) ja National Institute of Standards and Technology (NIST) kehittämä ohjelma. Ohjelman ensimmäinen versio 1.0 ilmestyi helmikuussa 2000. Tämän työn simuloinneissa käytetään ohjelmiston uusinta 6.5.3 versiota.

FDS:ä pääasiallinen käyttötarkoitus on tulipalotilanteiden simulointi. Ohjelmalla voidaan simuloida:

- Säteilevää ja konvektistä lämmön siirtymistä kiinteiden aineiden ja kaasujen välillä
  - Pyrolyysiä
  - Liekin ja palon leviämistä ja kasvamista
  - Palon sammutusta sekä hälyttimien ja automaattisten palonsammutusjärjestelmien laukeamista
  - Savun ja kaasun kuljettumista
- (McGrattan et al. 2017, s.3-4.)

### 9.2 *Termogravimetrinen analyysin simulointi*

Kartiokaloremetrikokeiden simuloinneissa tarvittavien kineettisten parametrien estimoinnista varten tarvitaan myös termogravimetrinen analyysin simulointeja. Parametreja joudutaan selvittämään TGA-analyysin avulla, koska kirjallisuudesta ei löydy suoraan käytettäväksi sopivia parametrien arvoja puun epähomogeenisuuden takia. Saatuja TGA-simulaatioiden tuloksia ei päästä validoimaan täysin, koska diplomityöhön varattuihin resursseihin ei ollut varattu oikean TGA-analyysin tekoa tammelle.

Simulointi mallinnettiin hyvin yksinkertaisena mallina, missä kappale mallinnetaan todella ohuena tasona ja kaasun käyttäytymistä säädellään. Simuloinnissa ohutta materiaalitasoa altistetaan lämpösäteilylle, jonka teho nousee kun ympäristön lämpötilaa nostetaan lineaarisesti. Kaasuvaiheessa tapahtuvaa konvektiota ja reaktiota ei huomioida simuloinnissa. Tämä yksinkertainen malli valittiin työhön, koska se vaatii vähiten tuntemattomia parametreja toimiakseen.

Ensimmäisen derivaatan kuvaaja eli DTG (differential thermogravimetry) kertoo massamuutoksen nopeudesta termogravimetrinen analyysin aikana. Massan muutokset näkyvät laskuina TGA-kuvaajassa ja ylöspäin suuntautuvina kumpuina DTG-kuvaajassa. Massan muutos on suurimmillaan DTG-kuvaajan kumpujen huipuilla. TGA-simulointien tuloksista voidaan laskea lisäksi reaktionopeuden parametrit eli aktivointi energia (E) ja pre-eksponentiaalitekijä (A). Tuloksista saadaan myös paloreaktion tuotteena syntyneen jäänneksen eli hiilen osuus.

Aktivointienergia  $A$  sekä pre-eksponentiaali-tekijä  $E$  voidaan laskea seuraavilla kaavoilla (Hostikka, S. & Matala, A. 2017 s.13.):

$$A = \frac{er_{p,a}}{Y_{s,a}(0)} \exp\left(-\frac{E}{RT_{p,i}}\right) \quad E = \frac{er_{p,a}}{Y_{s,a}(0)} \frac{RT_{p,i}^2}{T} \quad (10.2.1)$$

missä  $e$  on luonnollisen logaritmin kantaluku  
 $r_{p,a}$  on materiaali  $a$ :ssa tapahtuvan reaktion huippuarvo ( $^{\circ}\text{C/s}$ )  
 $Y_{s,a}(0)$  on haihtuvan materiaali  $a$ :n massaosuus  
 $R$  on kaasuvakio  
 $T_{p,i}$  on reaktion huippuarvon lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )

TGA-simulaatioista tehtiin kaksi versiota. Versioiden eroina oli koekappaleiden sisältämä kosteuspuiteisuus. Taulukossa 12 on esitetty simulaatioissa käytettyjen tiheyksien arvot sekä niiden lähteet. Koska hiilen lämmönjohtavuudelle ei löytynyt kirjallisuudesta suoraan käyttökelpoista arvoa, estimoitin lämmönjohtavuutta  $0.08\text{--}0.30 \text{ kJ/(K kg)}$  välillä eri simulaatioissa, joiden tuloksien perusteella lopulta  $0.20 \text{ kJ/(K kg)}$  valikoitui käytettäväksi lopullisissa simulaatioissa.

*Taulukko 12 Simuloinneissa käytettyjen tiheyksien arvot.*

	Kosteus 5%	Kosteus 10%	Lähde
<b>Tammi</b>			
Tiheys [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	720	757	Mitattu koekappaleesta
<b>Jäänös (hiili)</b>			
Tiheys [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	144	151	Lautenberger, C. 2007

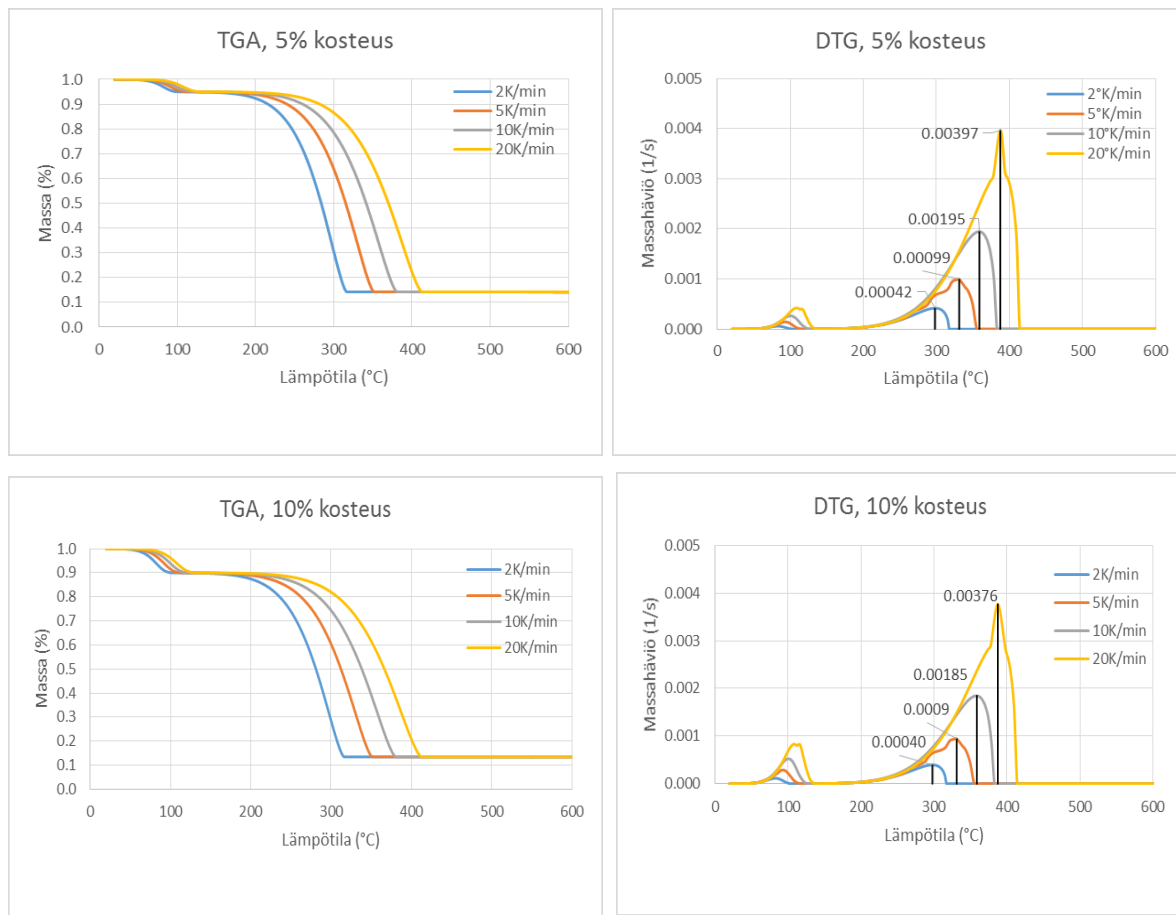
Jotta parametrien estimointien ennusteet olisivat mahdollisimman lähellä oikeita arvoja, suoritettiin simulaatiot usealla eri lämmitysnopeudella. Simulaatiot tehtiin  $2, 5, 10$  ja  $20^{\circ}\text{C}$  lämmitysnopeuksilla. Simulaation tuloksista lasketut arvot ovat esitelty taulukoissa 13 ja 14. Taulukoissa on esitelty myös pyrolyysin lämpötila-alueen leveys, mikä kertoo millä lämpötilojen välisellä alueella suurin osa koekappaleen massasta palaa pois TGA-kokeessa.

*Taulukko 13 TGA simuloinnin tulokset ja simuloinnin parametrien arvot 5%:n kosteudella.*

Koekappaleen sisältämä kosteus 5%						
Lämmitysnopeus ( $\text{K/min}$ )	Reaktion lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )	Jäänöksen massaosuus (hiili, %)	Materiaali $a$ :n massaosuus (%)	Aktivaatioenergia, $E$ ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )	Pre-eksponentiaali-tekijä, $A$ ( $\text{s}^{-1}$ )	Pyrolyysin lämpötila-alueen leveys ( $^{\circ}\text{C}$ )
2	298.02	0.1425	0.949	97.81	$1.02\text{E}+06$	165
5	331.19	0.1425	0.949	104.07	$2.72\text{E}+06$	200
10	358.79	0.1425	0.949	111.51	$8.89\text{E}+06$	229
20	387.51	0.1425	0.949	124.15	$7.18\text{E}+07$	257
keskiarvo		0.1425		109.38		

*Taulukko 14 TGA simuloinnin tulokset ja simuloinnin parametrien arvot 10%:n kosteudella.*

Koekappaleen sisältämä kosteus 10%						
Lämmitysnopeus ( $\text{K/min}$ )	Reaktion lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )	Jäänöksen massaosuus (hiili, %)	Materiaali $a$ :n massaosuus (%)	Aktivaatioenergia, $E$ ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )	Pre-eksponentiaali-tekijä, $A$ ( $\text{s}^{-1}$ )	Pyrolyysin lämpötila-alue leveys ( $^{\circ}\text{C}$ )
2	297.8	0.135	0.899	97.84	$1.03\text{E}+06$	164
5	331.2	0.135	0.899	104.16	$2.77\text{E}+06$	199
10	358.8	0.135	0.899	111.61	$9.07\text{E}+06$	229
20	387.5	0.135	0.899	124.32	$7.42\text{E}+07$	248
keskiarvo		0.135		109.48		



Kuva 31 Simuloidut TGA- ja DTG-kuvaajat.

TGA-kuvaajasta nähdään, että 100 asteen kohdalla vesi haihtuu puusta. Pyrolyysi alkaa 200 asteen kohdalla ja saavuttaa huippunsa 250-350 asteen välillä. Kosteuspitoisuudella on myös pieni vaikutus tuloksiin. Kosteuden ollessa suurempi, vaativat pyrolyysireaktiot korkeampia lämpötiloja käynnistyäkseen.

### 9.3 Kartiokaloremetrikokeen simulointi

Kartiokaloremetrikokeen simuloinnista pyrittiin mallintamaan oikeaa tilannetta vastaava. Simuloinnit toteutetaan molemmilla kosteuspitoisuuksilla, jotta nähtäisiin miten kosteus vaikuttaa tuloksiin. Molemmilla kosteuspitoisuuksilla mallinnetaan pyrolyysireaktio kahdella eri tavalla. Lopullista, optimoitua simulaatiota varten valitaan tarkimmat tulokset antanut simulaatio. Simulointia varten koekappale mallinnettiin oikeilla dimensioilla ja sille annettiin VTT:llä tehtyjen kartiokaloremetrikokeiden, kirjallisuudesta löydettyjen ja TGA-simulaatioista saatujen arvojen mukaiset parametrien arvot. Kartiokaloremetrikokeen simulointia varten tarvitaan myös parametrit reaktio- ja palamislämpö sekä reaktion kertaluku ( $n$ ). Reaktiolämpö on energian määrä mikä kuluu massayksikköä kohden materiaalin pyrolysoituessa. Palamislämpö ilmaisee kuinka paljon energiaa vapautuu massayksikköä kohden pyrolyysissä syntyvän kaasun palaessa. Reaktion kertaluku kuvaa reaktionopeuden riippuvuutta lähtöaineiden alkukonsentraatioista. Simuloinneissa käytettiin kertalukuna

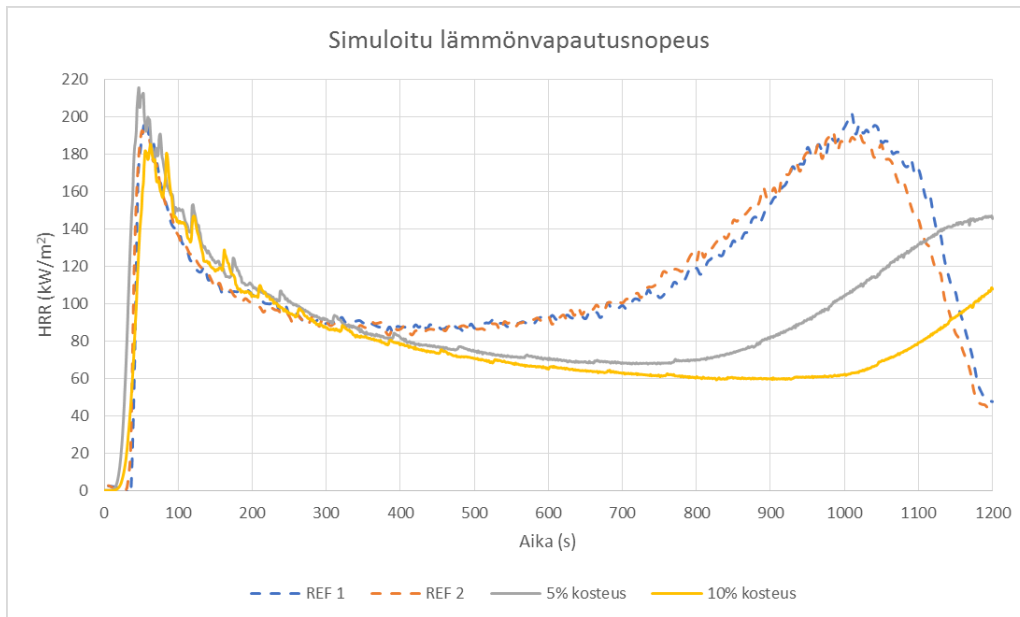
arvoa 1, joka on suositus jos tarkkaa kertalukua ei ole tiedossa. Taulukossa 15 on esitetty simulaatiossa käytettyjen parametrien arvot.

*Taulukko 15 Kartiokolorimetri simuloinnissa käytettyjen parametrit.*

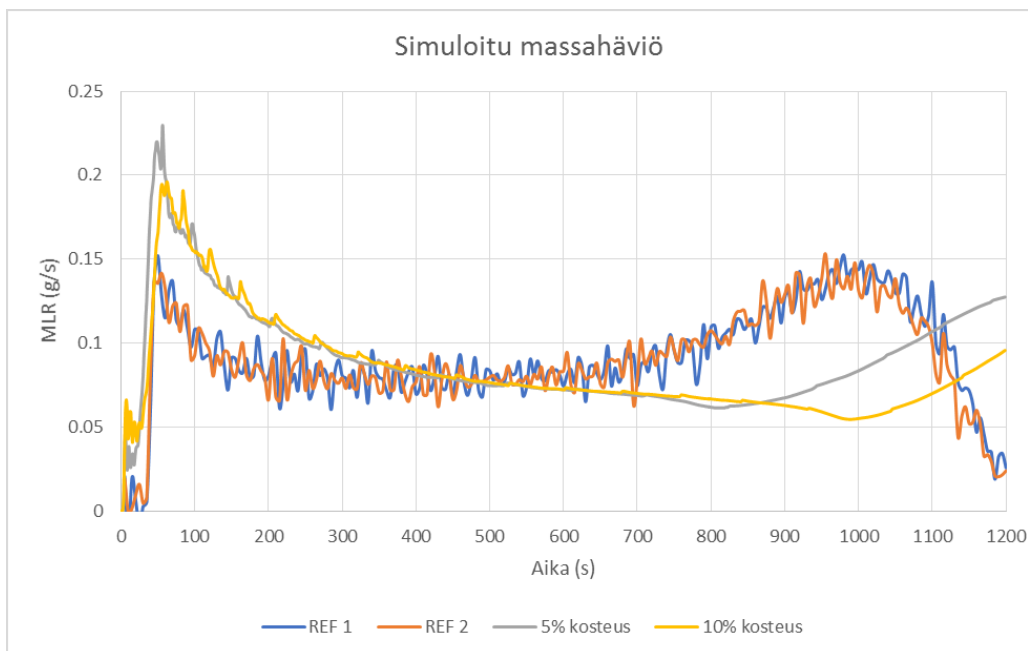
	Kosteus 5%	Kosteus 10%	Lähde
<b>Tammi</b>			
Tiheys [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	720	757	Mitattu koekappaleesta
Lämmönjohtavuus [ $\text{W}\cdot(\text{K}\cdot\text{m})^{-1}$ ]	0.18	0.18	Valmistajan ilmoittama
Ominaislämpökapasiteetti [ $\text{kJ}\cdot(\text{K kg})^{-1}$ ]	1.75 <b>20°C</b> 2.0 <b>100°C</b>	2.1 <b>20°C</b> 2.2 <b>100°C</b>	Radmanović, K. et al 2014
Reaktiolämpö [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	255	255	Rath, J. et al. 2001
Palamislämpö [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	11300	11300	Kartiokolorimetrikoe
Emissiivisyys	0.91	0.91	Hurley, M. J. et al. 2016
Aktivaatioenergia [ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]	109.38	109.48	TGA-simulaatio
Pre-eksponentiaalitekijä [ $\text{s}^{-1}$ ]	$2.11\cdot 10^7$	$2.18\cdot 10^7$	TGA-simulaatio
<b>Jäänös (hiili)</b>			
Tiheys [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	144	151	Lautenberger, C. 2007
Lämmönjohtavuus [ $\text{W}\cdot(\text{K}\cdot\text{m})^{-1}$ ]	0.2	0.2	Estimoitu arvo
Ominaislämpökapasiteetti [ $\text{kJ}\cdot(\text{K kg})^{-1}$ ]	0.75 <b>20°C</b> 1.00 <b>100°C</b> 1.25 <b>200°C</b> 1.5 <b>500°C</b>	0.75 <b>20°C</b> 1.00 <b>100°C</b> 1.25 <b>200°C</b> 1.5 <b>500°C</b>	Hankalin, V. et al. 2009
Emissiivisyys	1.0	1.0	Hostikka, S. & Matala, A. 2017

Simuloinnin pohjana on artikkelissa käytetty yhden askeleen simulointimalli koivulle, missä puumateriaali muuttuu lämmölle altistettuna hiileksi ja palavaksi kaasuksi. Lisäksi puusta vapautuu lämpötilan noustessa kosteutta, joka muuttuu vesihöyryksi. Simuloinnissa kappale altistetaan  $50\text{kW}/\text{m}^2$  ulkoiselle lämpösäteilylle ja palavana kaasuna käytetään propaania. (Hostikka, S. & Matala, A. 2017.)

Ensimmäisissä simulaatioissa pyrolyysi mallinnetaan käyttämällä kineettisiä parametrejä eli aktivaatioenergiaa, reaktion kertalukua ja pre-eksponentiaalitekijää. Kuvassa 32 on esitetty simulointien ja referenssikappaleille tehtyjen kartiokolorimetrikokeiden tulokset. Tuloksista nähdään, että simulointien tulokset noudattavat hyvin referenssikappaleiden tuloksia 400 sekuntiin saakka. Puun syttymisestä aiheutuva lämpötehon nousu 50 sekunnin kohdalla on lähes identtistä referenssikappaleiden kanssa. Puun hiiltymisen vaikuttaa olevan hitaampaa simulaatioissa ja palamiselle tyypillinen 2. piikki esiintyykin huomattavasti myöhemmin ja pienempänä simulointien tuloksissa. Lisäksi koekappaleiden sammuminen tapahtuu simuloinnissa myöhemmin.

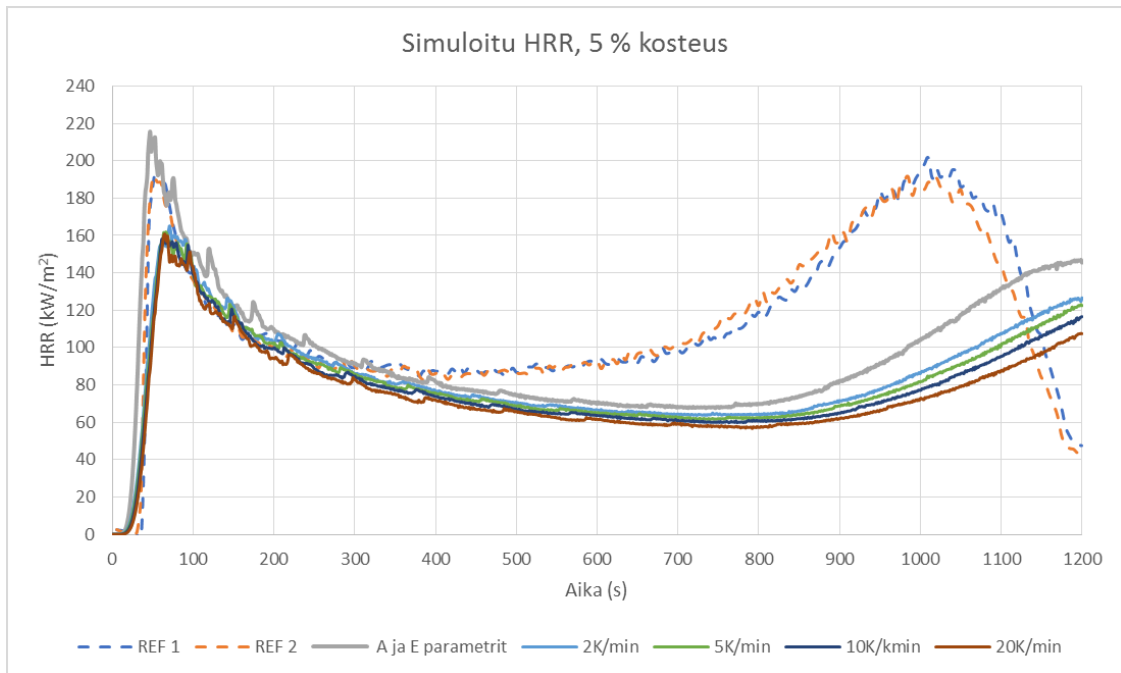


Kuva 32 Simuloidut lämmöntuottokäyrät 5 % ja 10 % kosteudelle sekä referenssikappaleiden käyrät.

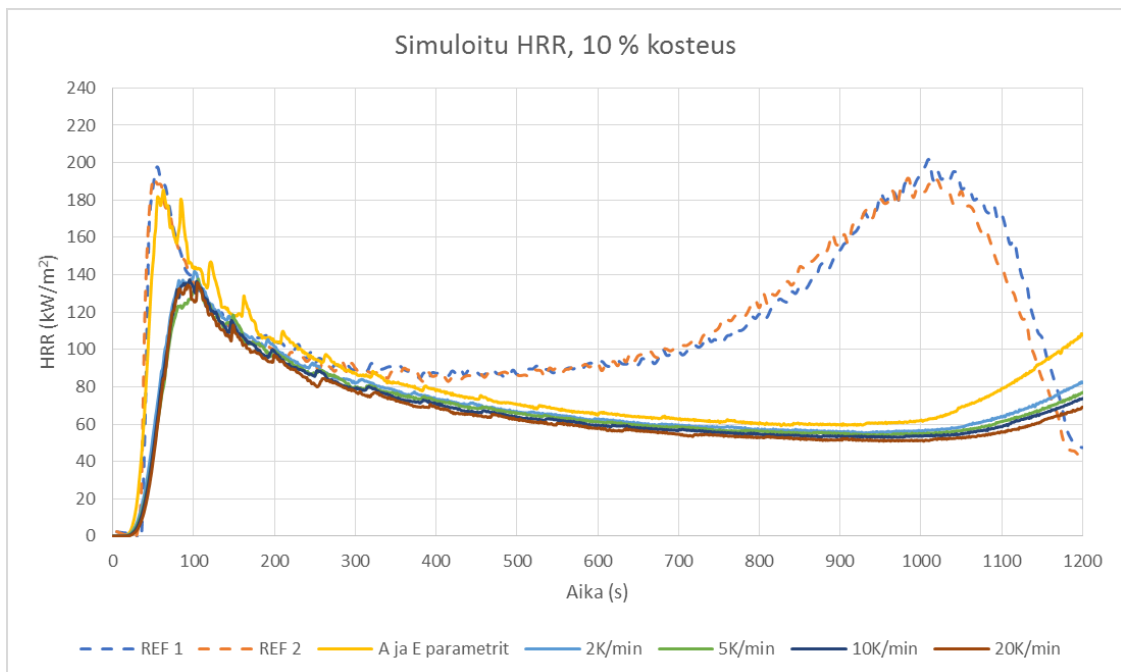


Kuva 33 Simuloidut massahäviöt 5 % ja 10 % kosteudelle sekä referenssikappaleiden käyrät.

FDS:ssä voidaan mallintaa pyrolyysireaktio myös käyttämällä muita TGA-analyysin tuloksia. FDS:ään tarvitsee syöttää A, E ja n parametrien tilalle pyrolyysin lämpötila-alueen leveys (pyrolysis range), reaktion lämpötila, jossa materiaalin massahäviö tapahtuu suurimmalla nopeudella (reference temperature), TGA-analyysissä käytetty lämmitysnopeus (heating rate) sekä DTG-kuvaajasta saatu huippuarvo (reference rate). Taulukoissa 13 ja 14 sekä kuvassa 31 on esitelty kyseisten parametrien arvot 5 % ja 10 % kosteuksilla.



Kuva 34 Simuloidut lämmöntuottokäyrät 5 % kosteudella.



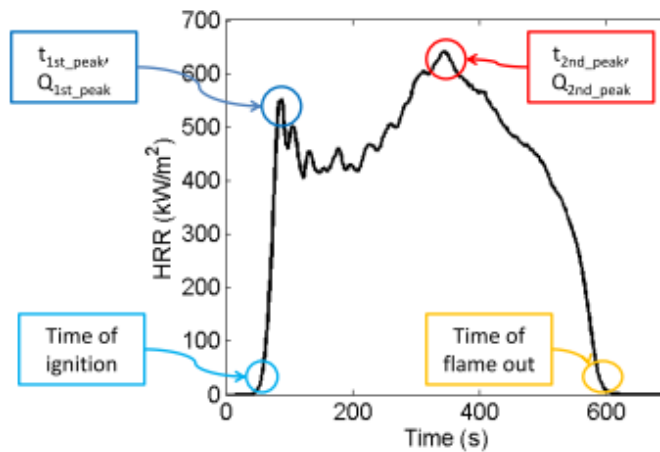
Kuva 35 Simuloidut lämmöntuottokäyrät 10 % kosteudella

Kuvista 34 ja 35 nähdään, että käyttämällä mallissa A ja E parametrejä, saadaan referenssikappaleiden 1. piikki mallinnettua tarkasti. Pyrolyysin parametrien arvoja käyttämällä 1. piikki syntyy ajallisesti myöhemmin sekä on lämmöntuotoltaan keskimäärin 26 % pienempi kuin referenssikappaleiden. Molemmissa simulointimalleissa toinen piikki tapahtuu ajallisesti huomattavasti myöhemmin kuin referenssikappaleilla.

## 9.4 Optimointi

Kappaleen 9.3 tulosten perusteella optimoitiin 10 % kosteudella tehtyä simulaatiota, missä on käytetty estimoituja kineettisiä parametreja. Optimoinnissa hyödynnetään kuvassa 36 esitettyä Anna Matalan väitöskirjassa (2013) olevaa taulukkoa. Matalan laatimasta taulukosta nähdään eri kineettisten ja termisten parametrien vaikutus lämmöntuottoon palon eri vaiheissa. Kappaleen 9.3 simulointien tulosten perusteella suurin muutos tarvitaan palon loppuvaiheisiin eli toiseen piikkiin sekä kappaleen sammumiseen ilman, että palon alkuvaiheiden tuloksiin tulee suuria muutoksia.

	$t_{ig}$	$t_{1st\_p}$	$Q_{1st\_p}$	$t_{2nd\_p}$	$Q_{2nd\_p}$	$t_{flameout}$
<b>Virgin material</b>						
A	- -	- -		+	+	-
E	++	++	- -	++	-	++
N						+
k	+	+		- -	+	-
$c_p$	+	+	-	++	-	+
$\Delta H$			-	+	- -	++
$\Delta H_c$		+	++	-	++	-
$\kappa$	+		+	+	-	+
$\epsilon$	++	++	- -	++	-	++
<b>Residue</b>						
k				+	++	- -
$c_p$			-			
$\epsilon$			++	-	+	- -

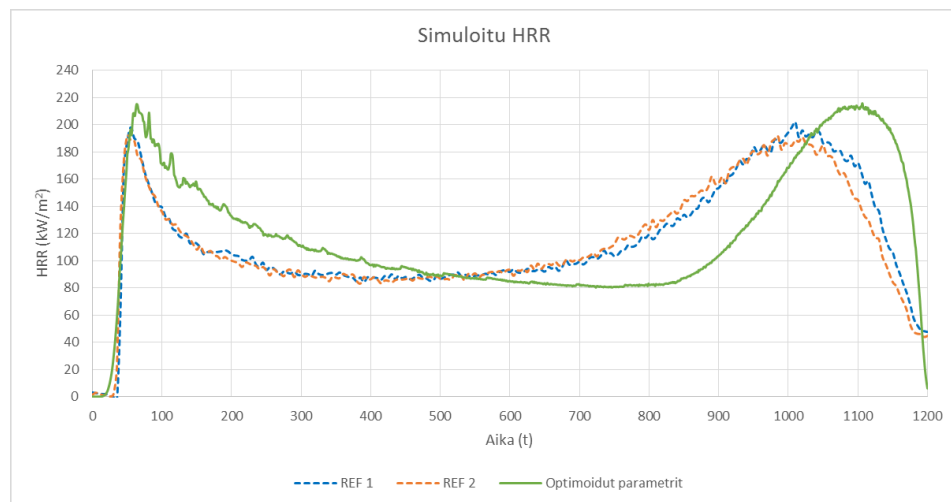


Kuva 36 Kineettisten ja termisten parametrien vaikutus lämmöntuottokäyrästään (Matala, A. 2013. s.63.)

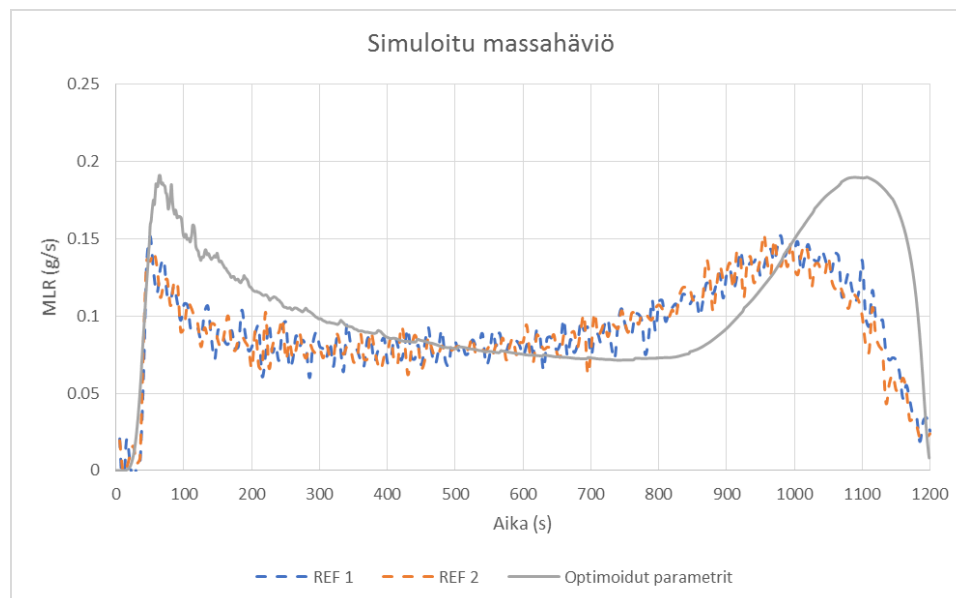
Matalan väitöskirjan taulukosta nähdään, että jäännöksen eli hiilen lämmönjohtavuudella on merkittävä vaikutus 2. piikkiin. Myös materiaalin reaktio- ja palamislämmöllä on piikkiä kasvattavia vaikutuksia. Näitä kineettisiä ja termisiä parametreja optimoitiin taulukossa 16 esitettyjen rajojen sisällä kunnes löydettiin tarkimmat tulokset antavat arvot. Samassa taulukossa on myös esitetty lopulliset parametrit, joilla simulaatio suoritettiin.

Taulukko 16 Simuloinnin parametrien optimointi välit ja käytetyt arvot.

	Optimointi väli	Simuloinnissa käytetty arvo
<b>Tammi</b>		
Ominaislämpökapasiteetti [kJ*(K kg) <sup>-1</sup> ]	1.60-2.20 <b>20°C</b> 1.8-2.60 <b>300°C</b>	1.75 <b>20°C</b> 2.0 <b>100°C</b>
Aktivaatioenergia [kJ*mol <sup>-1</sup> ]	95.00-115.00	109.00
Pre-eksponentiaalitekijä [s <sup>-1</sup> ]	[1.70-2.60]*10 <sup>7</sup>	2.18*10 <sup>7</sup>
<b>Jäännös (hiili)</b>		
Lämmönjohtavuus [W*(K*m) <sup>-1</sup> ]	0.10-0.40	0.30



Kuva 37 Optimoiduilla parametreillä tehty simulaatio.



Kuva 38 Optimoiduilla arvoilla tehdyn simulaation massahäviö.

Kuvista 37 ja 38 nähdään, että nyt simulaation tuloksissa toistuu kaikki palon vaiheet melko tarkasti. Ensimmäinen piikki simuloituu palotehokkaasti voimakkaampana, minkä myö-



tä myös lämpötehon alentuminen tapahtuu tehtyjen kokeiden tuloksia hitaammin. Toinen piikki esiintyy hieman myöhässä, mikä johtaa myös sammumisen siirtymiseen. Simulaation kappaleen sammuminen tapahtuu nopeammin kuin oikeiden kappaleiden.

## 9.5 Palosuoja-aineen mallintaminen ja simulointi

Simuloinnin viimeisessä osiossa keskitytään palosuoja-aineen mallintamiseen. Diplomi-työssä käytettyjen palosuoja-aineiden vähäisten vaikutusten vuoksi tässä kappaleessa palosuoja-aineiden simulointia käsitellään hyvin pelkistetyksi. Lähtökohtana mallinnuksen parametreille ovat palosuoja-aineilla käsiteltyjen koekappaleiden kartiokalorimetrikokeiden tulokset. Palosuoja-aineiden valmistajilta ei ole saatavilla tietoja aineiden sisällöistä, joten suojakerroksen parametrien arvot estimoidaan tutkimalla simulaatioiden tuloksia.

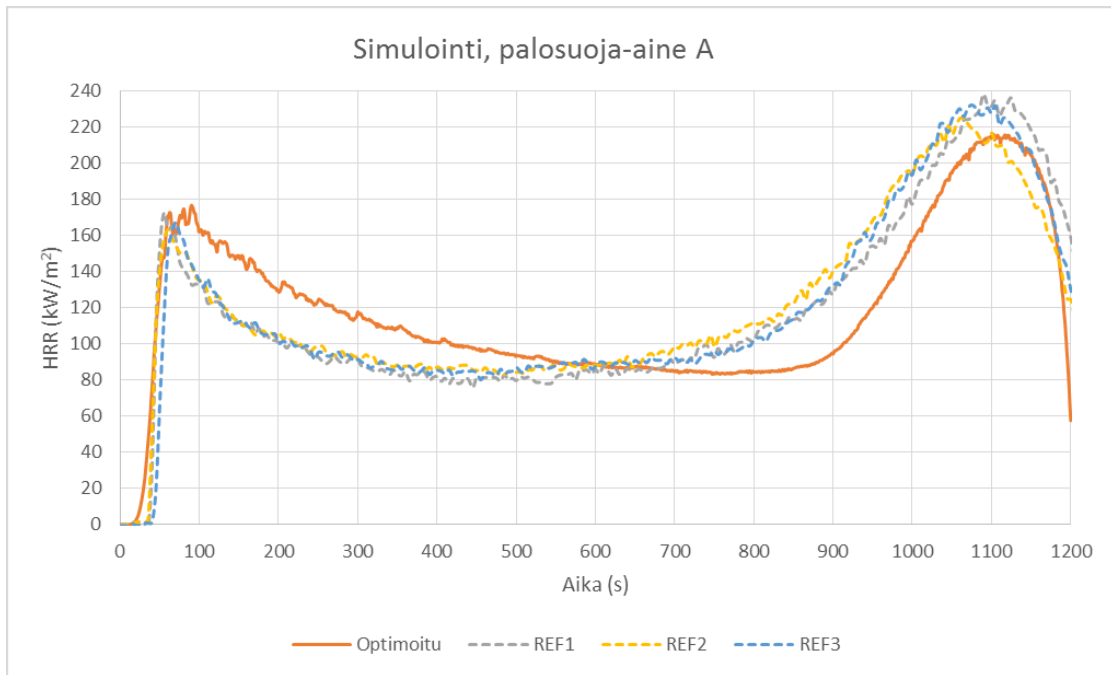
Simuloinnissa käytetään samaa simulointipohjaa kuin aikaisemmissa kartiokalorimetri simuloinneissa. Mallia muutetaan niin, että mallinnetun puukappaleen pinnalle luodaan koekappaleista mitattujen arvojen paksuinen kerros. Suojakerrokselle annetaan lisäksi koekappaleista mitattujen tiheyksien keskiarvo. Mallissa ei mallinneta oikeassa palotilanteessa tapahtuvaa palosuoja-aineiden turpoamista, koska tehdyissä kartiokalorimetrikokeissa ei mitattu suoja-aineiden turpoamista.

7.3.1 ja 7.3.2 Kappaleissa esitetyistä tuloksista nähdään, että palosuoja-aineet alentavat ensimmäisen piikin lämpötehoa, mutta nostavat hieman toisen piikin arvoja. Kuvan 36 tietoja hyödyntämällä kappaleiden 7.3.1 ja 7.3.2 tuloksiin, voidaan todeta, että palosuoja-aineen lämmönjohtavuus on arvoltaan hyvin pieni ja ominaislämpökapasiteetti taas suuri. Lämmönjohtavuudelle sekä ominaislämpökapasiteetille annetaan lähtöarvot tämän perusteella, joita sitten optimoidaan taulukossa 17 esitettyjen rajojen välillä niin, että simulaation tulokset olisivat lähellä kappaleiden 7.3.1 ja 7.3.2 tuloksia. Tammelle ja hiilelle käytetään optimoidussa simulaatiossa käytettyjä parametrien arvoja, mitkä ovat esitetty taulukossa 15.

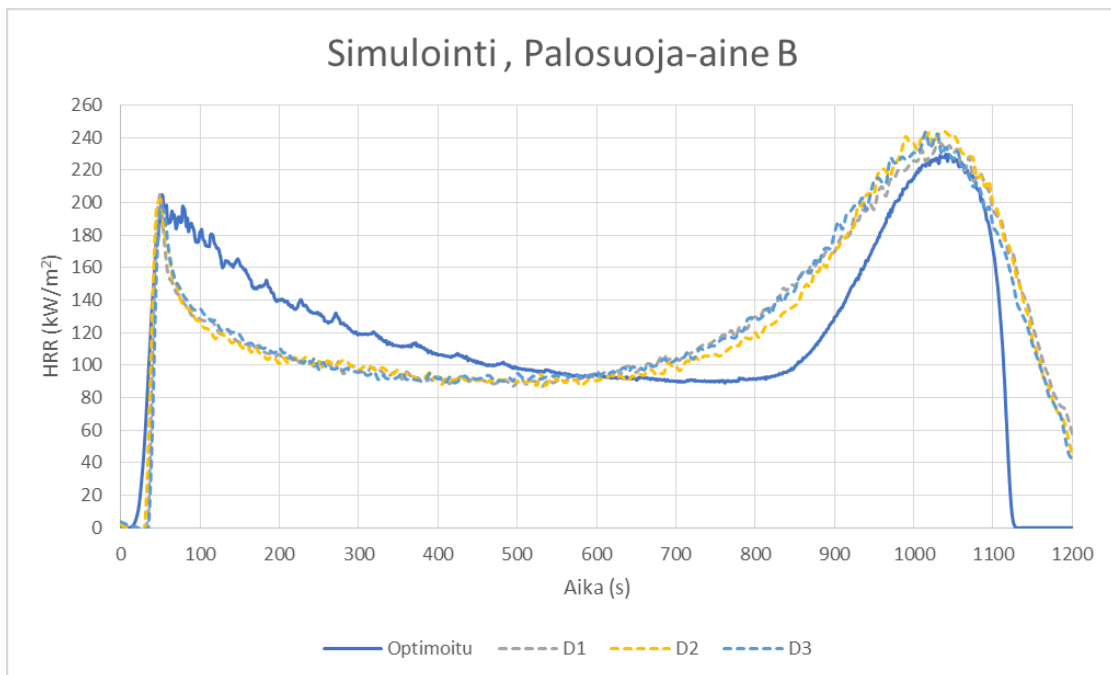
*Taulukko 17 Simuloinnissa käytettyjen parametrien optimointi välit sekä käytetyt arvot.*

	Optimointi väli	Simuloinnissa käytetty arvo Aine A	Simuloinnissa käytetty arvo Aine B
<b>Palosuoja-aine</b>			
Pinnan paksuus [mm]	-	0.1	0.1
Tiheys [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	-	127.51	85.3
Lämmönjohtavuus [ $\text{W}\cdot(\text{K}\cdot\text{m})^{-1}$ ]	0.01-0.80	0.040	0.055
Ominaislämpökapasiteetti [ $\text{kJ}\cdot(\text{K}\cdot\text{kg})^{-1}$ ]	1.00-6.00	1.50	1.30
Emissiivisyys	0.40-1.00	0.90	0.90

Optimointivaiheessa huomattiin, ominaislämpökapasiteetin arvolla ei ollut käytännössä suurta merkitystä tuloksiin, sillä suoja-aineen tiheys oli niin pieni.



Kuva 39 Palosuoja-aineella A käsiteltyjen kappaleiden tulokset ja simulointi.



Kuva 40 Palosuoja-aineella B käsiteltyjen kappaleiden tulokset ja simulointi.

Kuvista 39 ja 40 nähdään, että mallintamalla palosuoja-aine eristäväksi kerrokseksi puun pinnalle, saadaan ensimmäisen piikin lämpötehoa laskettua. Toinen piikki mallintuu molemmilla palosuoja-aineilla referenssikappaleiden tuloksia matalemmaksi. Lisäksi simuloitujen kappaleiden sammuminen tapahtuu ajallisesti huomattavasti nopeammin kuin referenssikappaleilla. Kuten edellisen kappaleiden tuloksissa, myös palosuoja-aineiden kohdalla eniten epätarkkuutta esiintyi vaiheissa, missä kappaleeseen alkaa muodostumaan hiilipinta.

## 10 Pohdinta

Diplomityön aikana tuli huomattua usein, miten monimutkainen materiaali puu on paloteknillisesti. Puun palo-ominaisuuksiin vaikuttaa hyvin moni asia ja voidaankin todeta, että puun palo-ominaisuuksien muovaantuminen alkaa kasvupaikasta ja päättyy vasta puun päätyessä lopulliseen määränpäähänsä. Palo-ominaisuuksien vaihtelevuus on hyvin suurta jopa puulajin sisällä, mikä kertoo paljon puun epähomogeenisuudesta.

Sisäverhouksien kohdalla on suuri merkitys minkä paloluokan tuote saavuttaa. Mikäli tuote ei täytä paloluokan B vaatimuksia, sen käyttö rajoittuu pääsääntöisesti pienten P3-luokan rakennuksien sisäverhoiluun. Paloluokituksestaan B-luokan saavuttaneet tuotteet käyvät suurienkin kohteiden kuten majoitus- ja toimistorakennusten sisäverhoiluun.

Markkinoilla on runsaasti eri palosuoja-aineita tarjolla, joilla pitäisi voida vaikuttaa tehokkaasti puun palo-ominaisuuksiin. Diplomityön tuloksien perusteella olisi syytä pohtia palosuoja-aineiden toimivuutta, vaikka suoranaisesti ei voida verrata erityisesti 50kW/m<sup>2</sup> lämpösäteilyllä tehtyjen kartiokalometrikokeiden tuloksia SBI-kokeeseen. Myös palosuojausten onnistumisen todentamisen vaikeus sekä vähäiset tutkimukset palosuoja-aineiden pitkäaikaiskestävyydestä heikentävät suojausten luotettavuutta.

Tulevaisuudessa voisi miettiä laajempien tutkimusten tekoa, jossa huomioitaisiin tarkemmin erityisesti palosuoja-aineiden levitysmäärien vaikutuksia tuloksiin. Lisäksi olisi syytä tutkia onko puulajeilla vaikutusta palosuoja-aineiden toimivuuteen, sillä useat palosuoja-aineet on koetettu vain 1-2 puulajikkeella.

Tulevaisuus näyttää kuitenkin erityisen valoisalta puuteollisuudelle, sillä päivitetty rakennusmääräykset astuvat voimaan loppuvuoden aikana. Ne mahdollistavat vielä laajemmin puun käytön rakentamisessa. Lisäksi diplomityötä kirjoittaessani, Åbo Akademiassa on keksitty rikin ja typen sidoksiin, sulfeeniamideihin perustuva myrkytön palosuoja-aine, joka rajoittaa palamista ylläpitävien kemiallisten reaktioiden toimintaa. Kyseistä palosuoja-ainetta tarvitaan vain murto-osan verran aikaisempiin aineisiin verrattuna. (Palmolahti, H. 2017.)

## 11 Johtopäätökset

VTT:llä tehtyjen kartiokalomietrikokeiden tulokset hämmästyttivät, koska odotusarvona oli, että palosuoja-aineilla olisi ollut selkeä vaikutus kartiokalomietrikokeiden tuloksiin. Tutkittujen palosuoja-aineiden vaikutukset olivat hyvin erilaisia verrattuna aikaisempien tutkimusten tuloksiin (Hakkarainen et al. 2005, Dietenberger, M. et al. 2012, Grexa, O., & Lübke H 2001, Wang et. al. 2014.) Suurimpia eroja aikaisempiin tutkimuksiin verrattuna oli syttymiseen kuluva ajassa sekä koekappaleiden kokonaislämmöntuotossa. Palosuoja-aineilla käsitelty koekappaleet syttyivät aikaisemmin tai lähes samaan aikaan referenssikappaleiden kanssa. Aikaisemmissa tutkimuksissa palosuoja-aineilla käsitelty koekappaleet ovat syttyneet selkeästi käsittelemättömiä kappaleita myöhemmin. Lisäksi palosuoja-aineilla oli kokonaislämmöntuottoa kasvattava vaikutus. Aikaisemmissa tutkimuksissa palosuoja-aineet ovat vähentäneet selkeästi kokonaislämmöntuottoa. Palosuoja-aineet kuitenkin toimivat ensimmäisen piikin kohdalla keskimääräisesti kuten suojaa-aineiden tulee toimia eli ne laskivat lämmönvapautumisnopeutta. Yksittäinen suuri vaikuttaja tuloksiin saattoi olla hyvin runsas palosuoja-aineiden levitysmäärä. Palosuoja-aine B:llä käsitelty koekappaleet syttyivät huomattavasti nopeammin kuin muut koekappaleet. Vesilakalla ei ollut merkittävästi heikentäviä vaikutuksia tuloksiin.

Paloluokituksen ennustettavuutta varten laadittiin laskentapohja, joka validoitiin ulkopuolisen tutkimuksen tuloksilla. Käytetty laskentamalli perustuu yksinkertaistettuihin reaktioihin sekä moneen oletukseen palon käyttäytymisestä. Todellisuudessa palon käyttäytymiseen liittyy hyvin monta muuttuvaa tekijää, joiden huomioiminen laskennallisesti on hyvin haastavaa. Laskentapohja ennusti keskimäärin koivun syttymisestä syntyvän lämpötehon 10 % pienemmäksi kuin oikeiden kokeiden tuloksissa. Setripuun ennusteissa syttymisestä aiheutuva lämpöteho oli keskimäärin 13 % suurempi. Koivulle 400-800 sekunnin välillä ennusteet ovat 7 % oikeiden kokeiden tuloksia matalampia. Setripuun ennusteet samalla aikavälillä olivat 22 % korkeampia kuin oikeiden kokeiden tulokset. Setripuun  $FIGRA_{0,2MJ}$ -arvojen ennusteet olivat keskimäärin 56 % korkeampia kuin oikeiden kokeiden vastaavat arvot. Koivun vastaavat ennusteet olivat taas keskimäärin 15 % korkeampia. Setripuun ennustetut  $THR_{600s}$ -arvot olivat keskimäärin 7 % oikeiden kokeiden arvoja pienempiä. Myös koivun ennustetut  $THR_{600s}$ -arvot olivat keskimäärin 30 % pienempiä. Tuloksien perusteella voidaan todeta, että tuloksien välillä on suurta vaihtelevuutta. Laskentamallin kehittäjät ovat todenneet, että laskentamallista voisi saada tarkemman esimerkiksi huomioiden liekin leviämisen pinta-alan ja syvyyden mukaan.

Tammen kartiokalomietrikokeiden perusteella tehtyjen paloluokkaennusteiden tulokset olivat yksiselitteisiä. Ennusteiden mukaan molemmilla palosuoja-aineilla koekappaleiden luokitus olisi C. B-sarjan koekappaleiden  $FIGRA_{0,2MJ}$ -arvot olivat keskimääräisesti 37 % suurempia kuin paloluokkaan B vaadittava 120 W/s raja-arvo. Vastaavasti koekappaleilla oli C-sarjassa 45 %, D-sarjassa 63 % ja E-sarjassa 37 % 120 W/s raja-arvoa suuremmat  $FIGRA$ -arvot. On syytä muistuttaa, että oikeissa SBI-kokeissa osa koekappaleista olisi voinut saavuttaa paloluokkaan B vaaditut raja-arvot, sillä validointitulosten perusteella laskentamalli ennustaa keskimäärin  $FIGRA$ -arvot 36 % oikeiden kokeiden tuloksia korkeammiksi.

Palosimulaatioiden tarkoituksena oli selvittää voidaanko palosimulointiohjelmiä kuten FDS:ää hyödyntää tuotekehityksessä. Tehdyt simulaatiot perustuivat parametrien arvoihin, jotka olivat kerätty kirjallisuudesta, tehdyistä kartiokalomietrikokeista sekä TGA-

simulaatioista. Saaduissa tuloksissa näkyivät molemmat lämmönvapautusnopeuksien piikit, mutta etenkin jälkimmäinen piikki oli arvoltaan pienempi kuin VTT:llä tehtyjen kartiokalorimetrikokeiden tuloksissa. Simulaatiossa käytettyjä parametreja optimoitiin, jotta simulaation tulokset vastaisivat paremmin todellisia kokeita. Optimoinnin lähtökohtana oli, että parametrien arvot vastaisivat oikeita puiden paloreaktioissa esiintyvien parametrien arvovälejä. Optimoinnin jälkeen tulokset vastasivat paremmin oikeiden kokeiden tuloksia, mutta niissä esiintyi edelleen kohtalaisia, keskimäärin 20 % eroavaisuuksia erityisesti hiiltymisvaiheessa. Palosuoja-aineen simuloinnista saadut tulokset todistavat, että palosuoja-aineen suojausmekanismi perustuu sen lämmöneristävyyteen.

Tulosten luotettavuutta arvioidessa tulee pitää mielessä, että puun palamiseen liittyy aina hyvin monia tekijöitä, jotka vaikuttavat merkittävästi palon käynnistymiseen, kehittymiseen ja loppuvaiheessa tapahtuvaan sammumiseen. Tehtyjen SBI-ennusteiden tulosten luotettavuutta on hankala arvioida, koska tammelle ei tehty oikeaa SBI-koetta. Laskentapohja on kuitenkin validoitu toimivaksi tutkimustuloksien perusteella. Lisäksi aikaisempien tutkimusten mukaan yksiulotteiseen termiseen liekinleviämiseen perustuvan laskentamalli ennustaa paloluokituksen keskimäärin 90 % varmuudella oikein (Kristoffersen, B. et al. 2003 s.45, Hakkarainen, T. & Kokkala, M. 2001 s.61). Simuloinneissa käytettyihin parametrien arvoihin liittyy aina epävarmuutta, sillä suurin osa niistä oli kerätty kirjallisuudesta tai muista lähteistä. Simulaation tuloksia kuitenkin pystyttiin vertailemaan tehtyihin kartiokalorimetrikokeisiin ja saadut tulokset noudattivat kohtalaisesti oikeiden kokeiden tuloksia. Luotettavuutta olisi voinut parantaa tekemällä koekappaleille enemmän erilaisia palokokeita, joiden tuloksina olisi saatu enemmän tietoa tammen termofysikaalista ominaisuuksista.

## Lähdeluettelo

Dietenberger, M., Grexa, O. & White, R. 2012 Reaction- to-fire of wood products and other building materials: part II, cone calorimeter tests and fire growth models. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory. 58 s.

E1 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2002. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto, 2002. 40 s

Gallagher, P. Handbook of thermal analysis and calorimetry. 1998. ELSEVIER SCIENCE B.V. 691 s. ISBN 0-444-82085-X

Grex, O., & Lübke H. 2001. Flammability parameters of wood tested on a cone calorimeter. Polymer Degradation and Stability Vol. 73, No. 3. 427-432 s.

Hakkarainen, T. & Kokkala, M. 2001. Application of a One-dimensional Thermal Flame Spread Model on Predicting the Rate of Heat Release in the SBI Test. Fire and Materials, 2001. Vol. 25, No. 61-70, s. 61-70.

Hakkarainen, T. & Kokkala, M. 2001. SBI-testin lämmöntuoton mallinnus. Palontorjuntatekniikka. Vol. 31, nro 3-4, s. 83-87. ISSN 0031-0476.

Hakkarainen, T. & Mikkola, E. 2005. Palosuojattujen puutuotteiden palokäyttäytymisen arviointi. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 10 s.

Hakkarainen, T., Mikkola, E., Östman, B., Tsantaridis, L., Brumer, H. & Piispanen, P. 2005. InnoFireWood. Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications. VTT [viitattu 14.2.2017]. Saatavissa: <http://virtual.vtt.fi/virtual/innofirewood/stateoftheart/ifw-stateoftheart.pdf>

Hankalin, V., Ahonen, T. & Raiko, R. 2009. On thermal properties of a pyrolysing wood particle. Finnish-Swedish Flame Days 2009, January 28-29. 16 s.

Hostikka, S. & Matala, A. 2017. Pyrolysis Model for Predicting the Heat Release Rate of Birch Wood. Combustion Science and Technology, 189:8. s.1373-1393. ISSN 0010-2202

Hurley, M. J. ym. 2016. SFPE Handbook of fire protection engineering. Viides painos. New York: Springer. 3493 s. ISBN 978-1-4939-2564-3.

Jantunen, J. 2016. Ympäristöministeriön rakennusten paloturvallisuudesta. Ympäristöministeriö. 35 s [Viitattu 14.3.2017] Saatavissa: <http://www.ymp.fi/download/noname/%7BC576485316C942699B758D98276E7FBB%7D/123506>

Knuutila, K. 2003. Puuenergia. Gummerus Kirjapaino Oy. 115 s. ISBN 952-5165-20-5

- Kokkala, M. , Baroudi, D. & Parker, W. J. 1997. Upward Flame Spread on Wooden Surface Products: Experiments and Numerical Modelling. Fire safety science: Proceedings of the 5th international symposium. s. 309-320.
- Kotlarewski, N., Ozarska, B. & Gusamo, B. 2014. Thermal Conductivity of Papua New Guinea Balsa Wood Measured using the Needle Probe Procedure. BioResources Vol. 9, No. 4, s. 5784-5793
- Kristoffersen, B. ym. 2003. Nordtest project 1526-01 “Using the Cone Calorimeter for Screening and Control Testing of Fire Retarded Wood Products”. Norwegian Fire Research Laboratory. 65 s.
- Lautenberger, C. 2007. A Generalized Pyrolysis Model for Combustible Solids. Väitöskirja. University of California, Mechanical engineering. 352 s.
- Lowden, A. & Hul, T. 2013. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. Fire Science Reviews Vol 2, No. 4. 19 s.
- Marney, D., Russell, L. & Mann, R. 2008. Fire performance of wood (*Pinus radiata*) treated with fire retardants and a wood preservative. Fire and Materials Vol.32. 357-370 s.
- Matala, A. 2013. Methods and applications of pyrolysis modelling for polymeric materials. Väitöskirja. Aalto-yliopisto. ISSN 2242-1203
- McGrattan, K. & McDermott, R. & Hostikka, S. & Floyd, J. 2017. Fire Dynamics Simulator (6 Edition) User’s Guide. NIST SP 1019. National Institute of Standards and Technology. 296 s.
- Mierlo, R. & Sette, B. 2005. The Single Burning Item (SBI) test method – a decade of development and plans for the near future. Heron, 2005 Vol. 50, No. 4, s.191-207.
- Nikolaeva, M. & Kärki, T. 2011. A Review of Fire Retardant Processes and Chemistry, with Discussion of the Case of Wood-plastic Composites. Baltic Forestry. Vol 17, No. 2, s. 314-326. ISSN 1392-1355
- Nurmi, A., Hakkarainen, T. & Kevarinmäki, A. 2010. Palosuojattujen puurakenteiden pitkäaikaistoimivuus VTT [viitattu 15.2.2012]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2010/W146.pdf>
- Palmolahti, H. 2017. Tulevaisuudessa asunnon voi ehkä suojata tulipalolta maalaamalla. YLE. [Viitattu 20.8.2017] saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-9473626>
- Paloposki, T. & Hakkarainen, T. Polyuretaanieristeisten sandwich-elementtien osallistuminen paloon. VTT. [viitattu 21.2.2012]. Saatavissa: [http://www.pelastusopisto.fi/download/38415\\_Polyuretaanieisteisten.pdf](http://www.pelastusopisto.fi/download/38415_Polyuretaanieisteisten.pdf)

Pauner, A. M. 2007. Two FR wood products – A comparison of test results between ISO 5660 (Cone Calorimeter test) and EN 13823 (SBI test method). [Viitattu 1.4.2017] saatavissa: [http://www.dbi-net.dk/media/DBI\\_Report\\_2007\\_01.pdf](http://www.dbi-net.dk/media/DBI_Report_2007_01.pdf)

Puuinfo. Puu materiaalina. Paloteknisiä ominaisuuksia [viitattu 14.2.2017]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi>

Radmanović, K., Đukić, I. & Pervan, S. 2014. Specific Heat Capacity of Wood. DRVNA INDUSTRIJA 65 (2). s.151-157.

Ragland, K. W., Aerts D. J. & Baker, A. J. 1991. Properties of Wood for Combustion Analysis. Bioresource Technology 37. s.161-168

Rath, J., Wolfinger, M.G., Steiner, G., Krammer, G., Barontini, F. & Cozzani, V. 2001. Heat of wood pyrolysis. Fuel 82 (2003), s. 81-91

Ross, R. ym. 2010. Wood Handbook, Wood as an Engineering Material. United States Department of Agriculture Forest Service. 509 s. ISBN 978-0898750829

Rowell, R. ym. 2005. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. Taylor & Francis Group. 474 s. ISBN 0-8493-1588-3

Sarvaranta, L. 1996. Fire retardant wood, polymer and textile materials, VTT tiedotteita 1730. VTT. 38 s. ISBN 951-38-4885-X

SFS-EN 13238. Reaction to fire tests for building products. Conditioning procedures and general rules for selection of substrates. 2010. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 11 s.

SFS-EN 13823. Reaction to fire tests for building products – Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto 2010. 99 s.

SFS-ISO 5660-1. Reaction to fire tests: heat release, smoke production and mass loss rate. Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 2015. 55 s.

Siikanen, U. 2008. Puurakentaminen. Rakennustieto Oy. 332 s. ISBN 978-951-682-862-9

Spearpoint, M. & Quintiere, J. 2000. Predicting the burning of wood using an integral model. Combustion and Flame Vol. 123, No. 3. 308-325 s.

Steen, A. 2002. Prediction of Heat Release in the Single Burning Item Test. Fire and Materials Vol. 26. 87–97 s.

Sundström, B. The Development of a European Fire Classification System for Building Products – Test Methods and Mathematical Modelling. 2007. Lund University, Lund. 116 s. ISSN 1402-3504



Tissari, J. 2008. Fine Particle Emissions from Residential Wood Combustion. University of Kuopio. 63 s. ISBN 978-951-27-0975-4

Visakh, P.M. & Aroa, Y. 2015. Flame Retardants: Polymer Blends, Composites and Nanocomposites. Springer International Publishing. 314 s. ISBN 978-3-319-03466-9

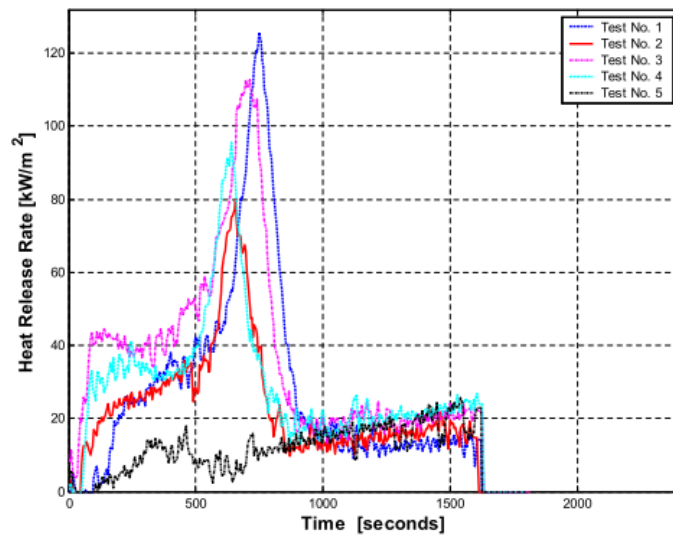
Weckman, H. Rakennustarvikkeiden uudet eurooppalaiset paloluokitukset Suomen rakentamismääräyksissä. Helsinki: Rakennustieto, 2002. Rakentajain kalenteri 2013. 1120 s. ISSN 0355-550X

Östman, B. & Tsantaridis, L. Heat release and classification of fire retardant wood products. Fire and Materials, 1995. Vol. 19, No. 6, s. 253-258.

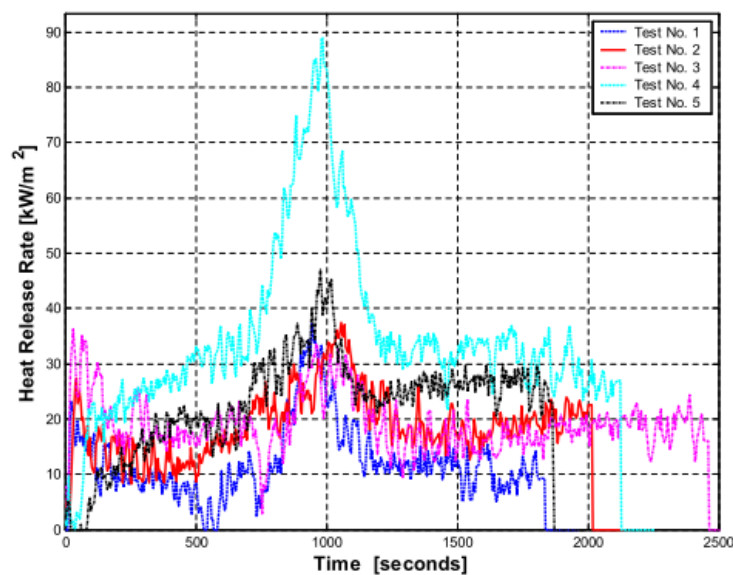
## Liiteluettelo

Liite 1. Setripuulle ja koivulle tehtyjen SBI-kokeiden tulokset sekä ennusteet. 3 sivua

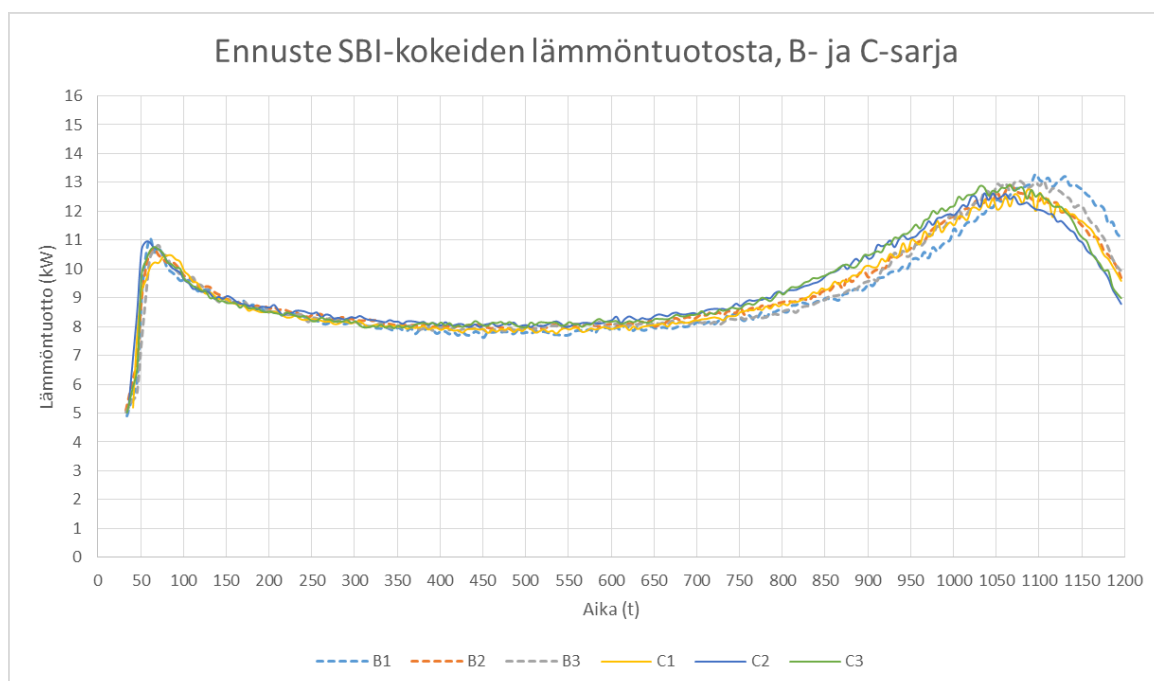
## Liite 1. Setripuulle ja koivulle tehtyt SBI-kokeet



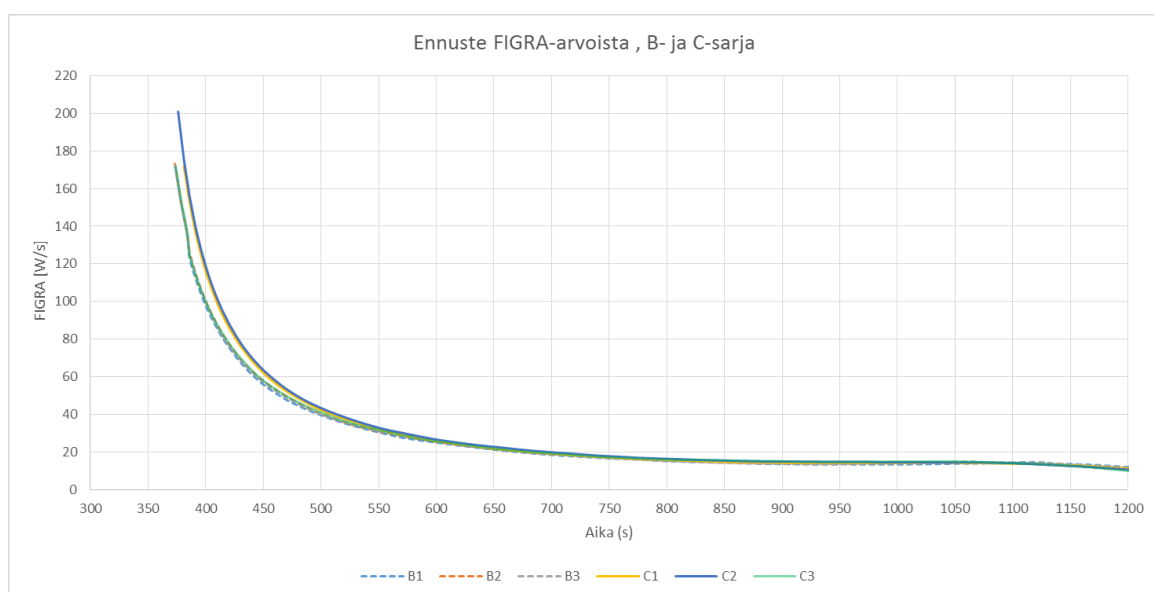
Kuva 41 Setripuulle tehtyjen kartiokaloremetrikokeiden HRR-käyrät. (Muokattu kuva, Pauner, A. M. 2007. s.19)



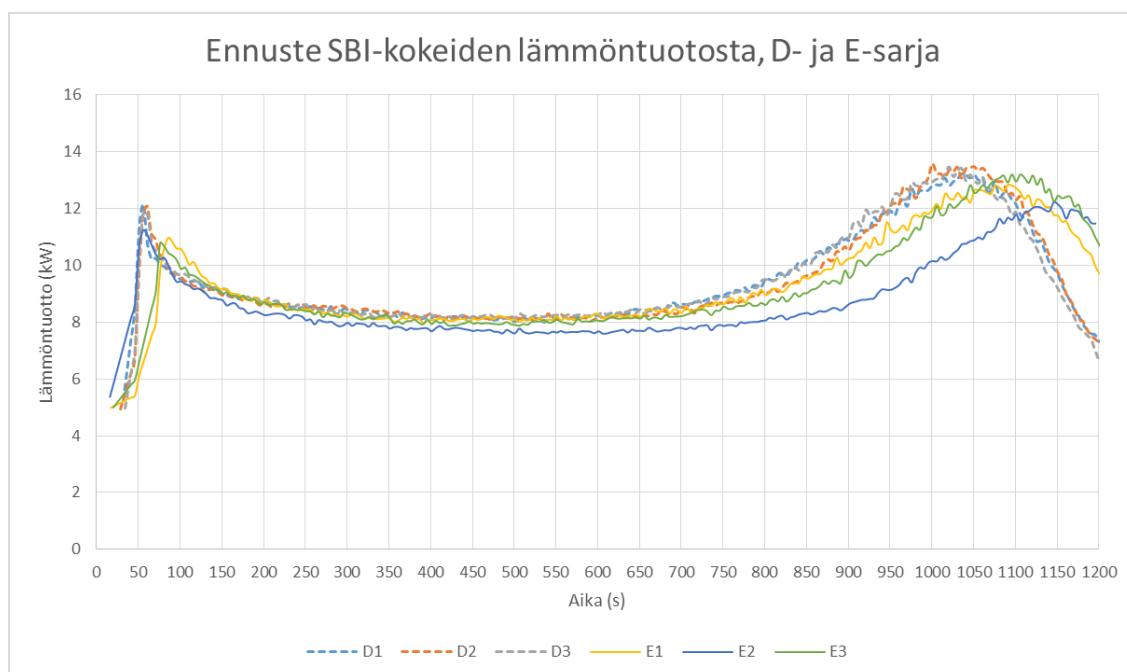
Kuva 42 Koivulle tehtyjen kartiokaloremetrikokeiden HRR-käyrät. (Muokattu kuva, Pauner, A. M. 2007. s.20)



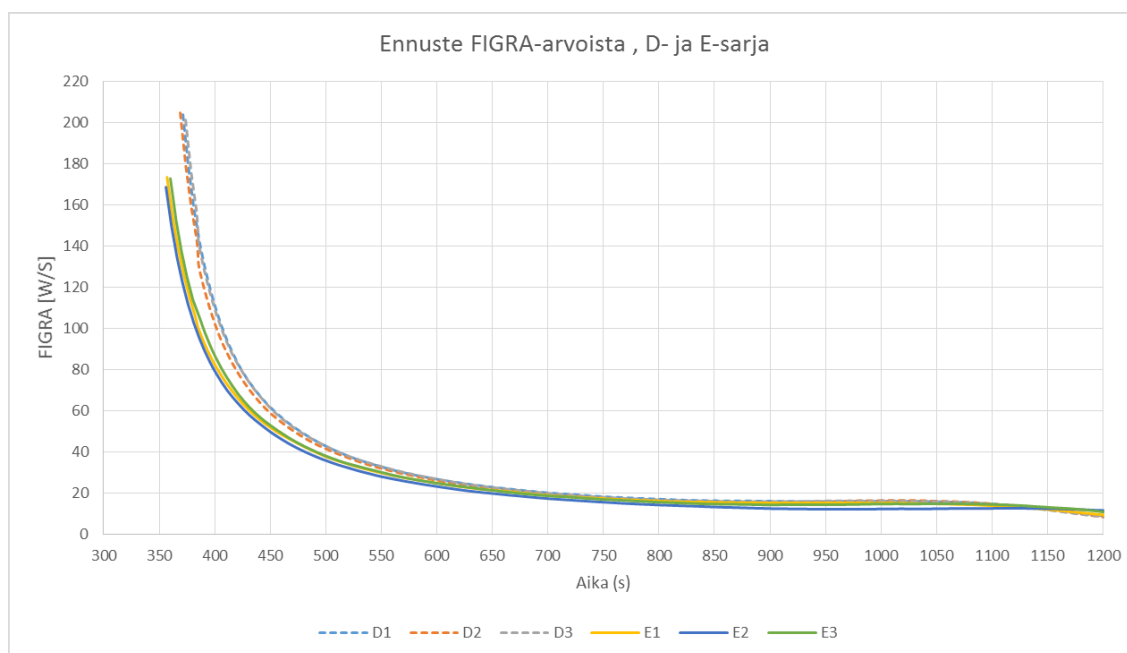
Kuva 43 Ennuste B- ja C-sarjan SBI-kokeiden lämmöntuotosta



Kuva 44 Ennuste B- ja C-sarjan FIGRA-arvoista



Kuva 43 Ennuste D- ja E-sarjan SBI-kokeiden lämmöntuotosta



Kuva 44 Ennuste D- ja E-sarjan FIGRA-arvoista